CHAPITRE 1

Manuel p. 16

Transformations acide-base

LE PROGRAMME

1. Déterminer la composition d'un système par des méthodes physiques et chimiques

A) Modéliser des transformations acide-base par des transferts d'ion hydrogène H^+

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Transformation modélisée par des transferts d'ion hydrogène H^+ : acide et base de Brönsted, couple acide-base, réaction acide-base.	Identifier, à partir d'observations ou de données expérimentales, un transfert d'ion hydrogène, les couples acide-base mis en jeu et établir l'équation d'une réaction acide-base.
Couples acide-base de l'eau, de l'acide carbonique, d'acides carboxyliques, d'amines.	Représenter le schéma de Lewis et la formule semi-développée d'un acide carboxylique, d'un ion carboxylate, d'une amine et d'un ion ammonium.
Espèce amphotère.	Identifier le caractère amphotère d'une espèce chimique.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

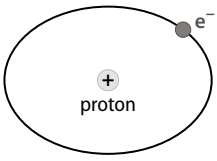
p. 16

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis les notions de composition atomique et de formation d'un ion.

› Exemple de réponse attendue

L'atome d'hydrogène H, de numéro atomique $Z = 1$, est constitué d'un noyau comportant un seul proton et d'un cortège électronique comportant un seul électron.



L'ion hydrogène H^+ est un atome d'hydrogène qui a perdu un électron, donc un ion hydrogène est un proton.

› En classe de Terminale

La notion d'ion hydrogène, ou proton, est réinvestie dans les **activités 1, 2 et 3** et, de façon plus générale, dans tout le chapitre, dans les définitions des acides et des bases selon Brønsted et dans la modélisation des réactions acide-base.

SITUATION 2

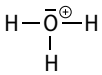
Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis la notion de schéma de Lewis d'un ion.

› Exemple de réponse attendue

L'atome d'hydrogène ($Z = 1$: $1s^1$) peut former une seule liaison covalente et ne possède pas de doublet non liant. L'atome d'oxygène ($Z = 8$: $1s^2\ 2s^2\ 2p^4$) peut former deux liaisons covalentes et possède deux doublets non liants.

Un **ion hydrogène H^+** est un atome d'hydrogène qui a perdu son unique électron, il ne possède pas de doublet d'électrons. On dit qu'il a une lacune électronique, qui est représentée par le rectangle vide.

Dans l'**ion oxonium H_3O^+**, un des doublets non liants de l'oxygène s'est transformé en doublet liant. L'oxygène a donc perdu un électron, de charge négative, il porte donc une charge positive.



› En classe de Terminale

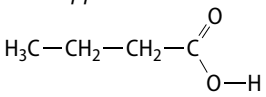
La notion de schéma de Lewis d'un ion est réinvestie dans l'**activité 3** et, de façon plus générale, dans la représentation du schéma de Lewis des couples acide-base d'acides carboxyliques et d'amines.

SITUATION 3

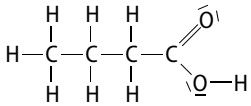
Il s'agit ici de vérifier que les élèves font bien le lien entre le nom d'une molécule, sa formule semi-développée et sa représentation de Lewis.

› Exemple de réponse attendue

Le nom de la molécule, acide butanoïque, indique que cette molécule appartient à la famille des acides carboxyliques. Elle possède donc un groupe carboxyle —COOH en bout de chaîne.
Le préfixe but- indique que la chaîne carbonée principale comporte 4 atomes de carbone.
Les atomes de carbone ($Z = 6$: $1s^2\ 2s^2\ 2p^2$) et d'hydrogène ($Z = 1$: $1s^1$) peuvent former une seule liaison covalente et ne possèdent pas de doublet non liant. L'atome d'oxygène ($Z = 8$: $1s^2\ 2s^2\ 2p^4$) peut former deux liaisons covalentes et possède deux doublets non liants.
Formule semi-développée :



Représentation de Lewis :



› En classe de Terminale

Les notions de formule semi-développée et de schéma de Lewis sont réinvesties dans l'**activité 3** et, de façon plus générale, lorsqu'on doit représenter la formule semi-développée et le schéma de Lewis des couples acide-base d'acides carboxyliques et d'amines.

ACTIVITÉS

p. 18 ACTIVITÉ 1

Évolution des notions d'acide et de base

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet de mettre en évidence l'évolution des définitions des acides et des bases au cours du temps.

› Exploitation et analyse

1. Boyle se contente de décrire ce qu'il se passe. Il définit les différences de comportement d'un acide et d'une base uniquement à l'aide de descriptions d'expériences : différentes colorations avec la teinture de tournesol, goût, consistance... Les autres définitions nécessitent de connaître la formule chimique des acides et des bases et permettent d'écrire des équations de réaction.

2. a. $HNO_3\ (\ell) \rightarrow H^+\ (aq) + NO_3^-\ (aq)$
$Ca(OH)_2\ (s) \rightarrow Ca^{2+}\ (aq) + 2\ HO^-\ (aq)$

b. Cette définition ne prend en considération que les solutions aqueuses.

3. Arrhenius et Brønsted donnent la même définition pour un acide : c'est une espèce capable de céder un proton H^+. Par contre, ils n'ont pas la même définition d'une base : pour Arrhenius, une base est une espèce qui libère un ion hydroxyde HO^- et, pour Brønsted, une base est une espèce qui capte un ion H^+.

4. $C_6H_8O_6 \rightarrow C_6H_7O_6^- + H^+$
$CO_3^{2-} + H^+ \rightarrow HCO_3^-$

› Synthèse

5. Les notions d'acide et de base ont évolué au cours du temps grâce aux découvertes scientifiques qui ont permis d'améliorer les connaissances de la structure de la matière.

p. 19 ACTIVITÉ 2

Réaction acide-base

Commentaires pédagogiques

Cette activité de découverte permet, à l'aide de la description d'observations expérimentales et des définitions des acides et des bases selon Brønsted, de modéliser une transformation chimique acide-base comme un transfert d'ion hydrogène H^+.

› Exploitation et analyse

1. a. Les deux réactifs sont le chlorure d'hydrogène HCl et l'ammoniac NH_3. Les deux réactifs sont sous forme gazeuse. Lors de la réaction, il y a formation du solide ionique $NH_4Cl\ (s)$, donc formation d'ions chlorure Cl^- et d'ions ammonium NH_4^+ donc :
• le chlorure d'hydrogène HCl cède un ion hydrogène H^+ pour former l'ion Cl^- : HCl joue le rôle de l'acide.
• l'ammoniac NH_3 capte un ion hydrogène H^+ pour former l'ion NH_4^+ : NH_3 joue le rôle de la base.

b. Les deux couples acide-base mis en jeu sont HCl / Cl^- et NH_4^+ / NH_3.
Les deux demi-équations acide-base sont :
$HCl = Cl^- + \mathbf{H^+}$
$NH_3 + \mathbf{H^+} = NH_4^+$

c. Pour établir l'équation de la réaction acide-base, il faut ajouter les deux demi-équations acide-base des deux couples mis en jeu.

$$HCl = Cl^- + \mathbf{H^+}$$
$$NH_3 + \mathbf{H^+} = NH_4^+$$
$$HCl + NH_3 + \cancel{\mathbf{H^+}} \rightarrow Cl^- + \cancel{\mathbf{H^+}} + NH_4^+$$

On élimine les ions hydrogène H^+ de chaque côté :
$HCl + NH_3 \rightarrow Cl^- + NH_4^+$
Finalement, on écrira l'équation de la réaction acide-base en tenant compte de l'état physique des réactifs et du produit :
$HCl\,(g) + NH_3\,(g) \rightarrow NH_4Cl\,(s)$

2. a. Les deux réactifs sont les ions hydroxyde HO^- et les ions ammonium NH_4^+. Les deux réactifs sont des ions solvatés en phase aqueuse : $HO^-\,(aq)$ et $NH_4^+\,(aq)$. Lors de la réaction, il y a formation d'ammoniac $NH_3\,(aq)$, donc :
• l'ion ammonium $NH_4^+\,(aq)$ cède un ion hydrogène H^+ pour former une molécule $NH_3\,(aq)$: $NH_4^+\,(aq)$ joue le rôle de l'acide.
• l'ion hydroxyde $HO^-\,(aq)$ capte un ion hydrogène H^+ pour former une molécule $H_2O\,(\ell)$: $HO^-\,(aq)$ joue le rôle de la base.

b. Les deux couples acide-base mis en jeu sont : $NH_4^+\,(aq)$ / $NH_3\,(aq)$ et $H_2O\,(\ell)$ / $HO^-\,(aq)$.
Les deux demi-équations acide-base sont :
$NH_4^+\,(aq) = NH_3\,(aq) + \mathbf{H^+}$
$HO^-\,(aq) + \mathbf{H^+} = H_2O\,(\ell)$

c. Pour établir l'équation de la réaction acide-base, il faut ajouter les deux demi-équations acide-base des deux couples mis en jeu.

$$NH_4^+\,(aq) = NH_3\,(aq) + \mathbf{H^+}$$
$$HO^-\,(aq) + \mathbf{H^+} = H_2O\,(\ell)$$
$$NH_4^+\,(aq) + HO^-\,(aq) + \cancel{\mathbf{H^+}} \rightarrow NH_3\,(aq) + \cancel{\mathbf{H^+}} + H_2O\,(\ell)$$

Finalement, on écrira l'équation :
$$NH_4^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow NH_3\,(aq) + H_2O\,(\ell)$$

3. Les molécules $NH_3\,(aq)$ qui se forment initialement en solution aqueuse s'échappent ensuite sous forme de molécules gazeuses $NH_3\,(g)$. Ce changement d'état est favorisé par l'élévation de température car la solution est chauffée.

› Synthèse

4. a. Dans l'observation n° 1, on a vu que :
$NH_3 + H^+ = NH_4^+$: la base NH_3 capte un ion H^+ pour former l'acide NH_4^+.
Dans l'observation n° 2 on a vu que :
$NH_4^+ = NH_3 + H^+$: l'acide NH_4^+ cède un ion H^+ pour former la base NH_3.
La demi-équation acide-base traduit la possibilité de passer de la forme acide à la forme basique et réciproquement. L'échange de l'ion hydrogène H^+ entre les deux formes du couple NH_4^+/NH_3 peut donc s'écrire avec un =, qui modélise les deux situations.

b. La première équation établie met en jeu les deux couples HCl / Cl^- et NH_4^+ / NH_3 :

Transfert d'un ion hydrogène H^+

$$\underset{\text{acide 1}}{HCl} + \underset{\text{base 2}}{NH_3} \rightarrow \underset{\text{base 1}}{Cl^-} + \underset{\text{acide 2}}{NH_4^+}$$

La seconde équation établie met en jeu les deux couples $NH_4^+\,(aq)$ / $NH_3\,(aq)$ et $H_2O\,(\ell)$ / $HO^-\,(aq)$:

Transfert d'un ion hydrogène H^+

$$\underset{\text{acide 1}}{NH_4^+\,(aq)} + \underset{\text{base 2}}{HO^-\,(aq)} \rightarrow \underset{\text{base 1}}{NH_3\,(aq)} + \underset{\text{acide 2}}{H_2O\,(\ell)}$$

Une transformation acide-base peut être modélisée comme un transfert d'ion hydrogène H^+ entre l'acide d'un premier couple acide-base vers la base d'un second couple acide-base. Il se forme alors la base du premier couple et l'acide du second couple.

p. 20 ACTIVITÉ 3

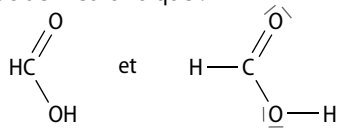
Schéma de Lewis d'un couple acide-base

Commentaires pédagogiques

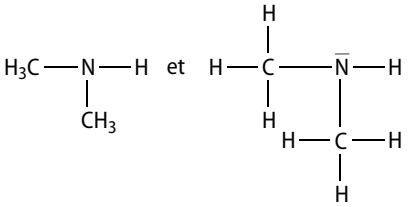
Cette activité permet d'élaborer un raisonnement qui explique comment passer de la représentation de Lewis de la forme acide d'un couple à celle de sa base conjuguée, et inversement.

› Réponses aux coups de pouce

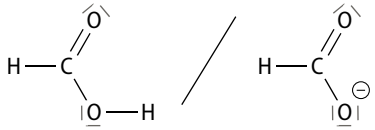
• 1 (p. 592) : Les atomes forment des liaisons covalentes (doublets liants) afin d'acquérir la structure électronique du gaz noble le plus proche.
L'atome d'hydrogène H, présent dans la première colonne du tableau périodique, possède un seul électron de valence. Il tente d'acquérir la structure de l'hélium à 2 électrons, il va donc former une liaison covalente : il possède 1 doublet liant et 0 doublet non liant.
L'atome d'oxygène O, présent dans la 6e colonne, possède 6 électrons de valence. Il tente d'acquérir la structure du néon à 8 électrons, il va donc former 2 liaisons covalentes : il possède 2 doublets liants et 2 doublets non liants.
L'atome de carbone C, présent dans la 4e colonne, possède 4 électrons de valence. Il tente d'acquérir la structure du néon à 8 électrons, il va donc former 4 liaisons covalentes : il possède 4 doublets liants et 0 doublet non liant.
L'atome d'azote N, présent dans la 5e colonne, possède 5 électrons de valence. Il tente d'acquérir la structure du néon à 8 électrons, il va donc former 3 liaisons covalentes : il possède 3 doublets liants et 1 doublet non liant.
• 2 (p. 594) : Les formules semi-développées et les représentations de Lewis des deux molécules sont :
– pour l'acide méthanoïque :



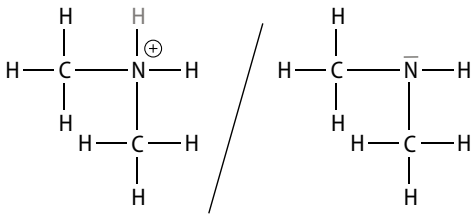
– pour la N-méthylméthanamine :



• **3 (p. 595) :** Cherchons la base conjuguée de l'acide méthanoïque. D'après le doc. 1, l'acide méthanoïque est un acide car son groupe carboxyle (—COO**H**) est capable de libérer un ion hydrogène H^+. Cela signifie que l'atome d'hydrogène « quitte » la molécule en laissant son électron. Le doublet liant entre l'atome d'oxygène et l'atome d'hydrogène se transforme en doublet non liant, l'oxygène se retrouve alors avec un électron supplémentaire et il porte donc une charge négative. L'espèce obtenue est l'anion méthanoate, la base conjuguée de l'acide méthanoïque.
Le couple acide méthanoïque / ion méthanoate s'écrit, avec les représentations de Lewis :



D'après le doc. 2, les amines sont des espèces capables de capter un ion H^+, grâce au doublet non liant porté par l'atome d'azote N. Les amines sont donc des bases selon la définition de Brønsted. La N-méthylméthanamine est une base, cherchons son acide conjugué.
Le doublet non liant porté par l'atome d'azote N se transforme en doublet liant afin de former une liaison covalente entre l'azote et l'hydrogène. L'azote N se retrouve alors avec un électron en moins et porte donc une charge positive. L'espèce obtenue est le cation N-méthylméthanammonium.
Le couple N-méthylméthanammonium / N-méthylméthanamine s'écrit, avec les représentations de Lewis :



› Conclusion

Pour passer de la représentation de Lewis de la forme acide à la forme basique, il faut enlever un atome d'hydrogène H à la formule de l'acide, transformer le doublet liant de l'hydrogène « partant » en doublet non liant puisque l'atome d'hydrogène « quitte » l'espèce acide en laissant son électron, et enfin ajouter une charge négative sur l'élément qui a perdu l'hydrogène.
Pour passer de la représentation de Lewis de la forme basique à la forme acide, il faut ajouter un atome d'hydrogène H à la formule de la base, il faut transformer un doublet non liant en doublet liant pour que l'hydrogène H se « fixe » sur la base et ajouter une charge positive sur l'élément qui a gagné l'hydrogène.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel *p. 26*

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car elle correspond à la définition d'une base selon Brønsted.
La proposition B est la bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car elle correspond à la définition d'une base selon Arrhenius.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, pour trouver la base conjuguée d'un acide, il faut « enlever un ion H^+ » à la molécule d'acide et, dans cette proposition, on a ajouté un ion H^-.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, pour trouver la base conjuguée d'un acide, il faut « enlever un ion H^+ » à la molécule d'acide et, dans cette proposition, on a enlevé un ion H^-.
La proposition C est la bonne réponse.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, dans un couple acide-base, la base est située à droite du couple, et non à gauche.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'ion NH_2^- (aq) n'est pas l'acide conjugué de l'ammoniac. Son acide conjugué est l'ion NH_4^+ (aq).

4 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, dans cette proposition, c'est la base qui libère un ion hydrogène H^+, alors que c'est l'acide (NH_3OH^+ (aq), que l'on peut noter BH^+) qui libère un ion hydrogène H^+ suivant la demi-équation $BH^+ = B + H^+$. De plus, dans cette proposition, il n'y a ni conservation des éléments ni conservation de la charge électrique.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car une espèce amphotère est une espèce chimique qui peut être soit un acide soit une base.

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C est une bonne réponse.

6 La proposition A est une bonne réponse

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C est une bonne réponse.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le couple acide-base NH_3 (aq) / NH_4^+ (aq) est mal écrit, l'acide doit être écrit en premier : NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq).

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car le couple acide-base HCO_2^- (aq) / HCO_2H (aq) est mal écrit, l'acide doit être écrit en premier : HCO_2H (aq) / HCO_2^- (aq).

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car il y a une double flèche et non une simple flèche qui modélise une réaction totale. De plus, NH_4^+ (aq) ne fait pas partie des réactifs, c'est un produit.

La proposition B n'est pas une bonne réponse car il y a une double flèche et non une simple flèche qui modélise une réaction totale.

La proposition C est une bonne réponse.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car les couples acide-base ne sont pas écrits correctement : les acides et les bases ne correspondent pas, NH_3 (aq) n'est pas l'acide conjugué de H_2O (ℓ) et NH_4^+ (aq) n'est pas l'acide conjugué de HO^- (aq).

La proposition B n'est pas une bonne réponse car le couple acide-base NH_3 (aq) / NH_4^+ (aq) est mal écrit, l'acide doit être écrit en premier : NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq).

La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases *p. 27*

› 1. Les acides et les bases

10 **1.** Selon la théorie de Brønsted :
– un acide est une espèce chimique capable de céder un ion hydrogène H^+ ;
– une base est une espèce chimique capable de capter un ion hydrogène H^+.

2. Tableau de couples acide-base conjugués :

Acide	H_3PO_4	H_2O	ClOH	H_2S	HS^-	NH_4^+
Base	$H_2PO_4^-$	HO^-	ClO^-	HS^-	S^{2-}	NH_3

11 **1.** Les couples acide-base sont :
H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) ; H_2O (ℓ) / HO^- (aq).

2. H_3O^+ (aq) = H_2O (ℓ) + H^+
H_2O (ℓ) = HO^- (aq) + H^+

12 **1.** NaOH (s).

2. NaOH (s) → Na^+ (aq) + HO^- (aq)

3. L'ion HO^- (aq) est une base selon la définition de Brønsted, c'est une espèce capable de capter un ion H^+ : HO^- (aq) + H^+ = H_2O (ℓ)

4. Il appartient au couple acide-base H_2O (ℓ) / HO^- (aq).

13 **1.** HCN (aq) / CN^- (aq).

2. HCN (aq) = CN^- (aq) + H^+

14 **1.** CH_3CO_2Na (s) → $CH_3CO_2^-$ (aq) + Na^+ (aq)

2. L'ion $CH_3CO_2^-$ (aq) est une base selon la définition de Brønsted :
$CH_3CO_2^-$ (aq) + H^+ (aq) = CH_3CO_2H (aq)

3. Il appartient au couple acide-base :
CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq).

› 2. Quelques couples acide-base

15 **1.** H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) ; H_2O (ℓ) / HO^- (aq).

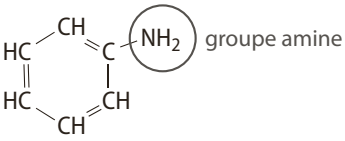
2. L'eau est la base du premier couple et l'acide du second couple. L'eau est une espèce amphotère car, suivant les espèces chimiques présentes en solution, l'eau se comporte soit comme une base soit comme un acide.

16 **1.** NH_3 est une base selon Brønsted, c'est une espèce chimique capable de capter un ion H^+ :
$NH_3 + H^+ = NH_4^+$
Le couple s'écrit NH_4^+ / NH_3.

2. a. Dans ce second couple, l'ammoniac NH_3 est un acide, c'est une espèce chimique capable de céder un ion H^+.
b. $NH_3 = NH_2^- + H^+$. La formule de l'ion amidure est NH_2^-. Le couple est NH_3 / NH_2^-.

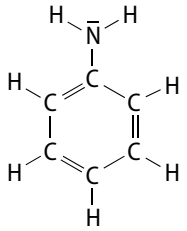
3. L'ammoniac est la base du couple NH_4^+ / NH_3 et l'acide du couple NH_3 / NH_2^-. L'ammoniac est une espèce amphotère.

17 **1. a.** La formule brute de l'aniline est : C_6H_7N.
La formule semi-développée de l'aniline est :



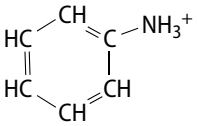
b. Le groupe caractéristique est le groupe amine, cette molécule appartient à la famille chimique des amines.

c. La représentation de Lewis de l'aniline est :

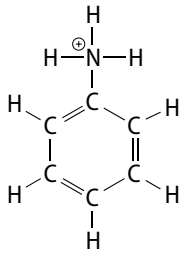


2. a. Cette molécule est une base selon la définition de Brønsted car elle est capable de capter un ion H^+ grâce au doublet non liant présent sur l'azote.

b. La formule semi-développée de son espèce conjuguée est :



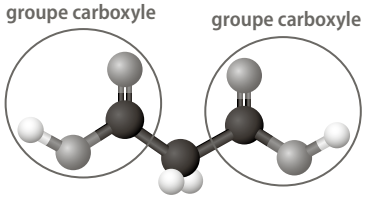
Le doublet **non liant** porté par l'atome d'azote N se transforme en doublet liant afin de former une liaison covalente entre l'azote et l'hydrogène. L'azote N se retrouve alors avec un électron en moins et porte donc une charge positive. Sa représentation de Lewis est :



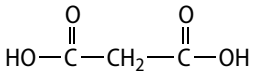
18 **1.** L'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) appartient à deux couples acide-base qui sont :
CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq).

2. L'ion HCO_3^- (aq) est la base du couple CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et l'acide du couple HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq). L'ion HCO_3^- (aq) est une espèce amphotère.

19 **1.** La chaîne principale carbonée de cette molécule possède 3 atomes de carbone, d'où le nom de **propane**. De plus, cette molécule possède deux groupes carboxyle. Le groupe carboxyle est caractéristique des acides carboxyliques, d'où le nom d'acide et la terminaison dioïque.

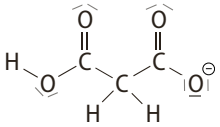


2. La formule semi-développée de cette molécule est :

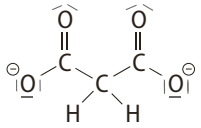


3. Chaque groupe carboxyle (—COO**H**) est capable de libérer un ion hydrogène H^+. L'acide malonique, qui possède deux groupes carboxyle, est un diacide car cette molécule est capable de libérer deux ions H^+.

4. Un de ces groupes carboxyles (—COO**H**) est capable de libérer un ion hydrogène H^+. Cela signifie que l'atome d'hydrogène « quitte » la molécule en laissant son électron. Le doublet liant entre l'atome d'oxygène et l'atome d'hydrogène se transforme en doublet **non liant**. L'oxygène se retrouve alors avec un électron supplémentaire, il porte donc une charge négative.
La représentation de Lewis de l'ion hydrogénomalonate est :

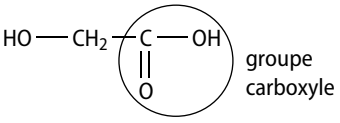


5. De la même façon, la représentation de Lewis de l'ion malonate est :

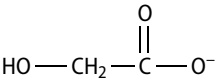


6. L'ion hydrogénomalonate $C_3O_4H_3^-$ (aq) est la base du couple $C_3O_4H_4$ (aq) / $C_3O_4H_3^-$ (aq) et l'acide du couple $C_3O_4H_3^-$ (aq) / $C_3O_4H_2^{2-}$ (aq). L'ion hydrogénomalonate $C_3O_4H_3^-$ (aq) est une espèce amphotère.

20 **1.** Formule semi-développée de l'acide glycolique :

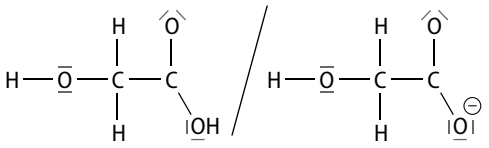


2. Formule semi-développée de l'ion glycolate :

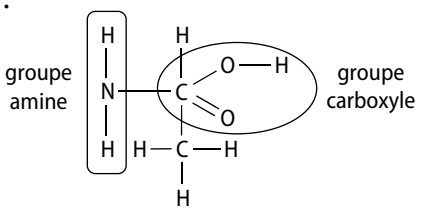


3. Le groupe carboxyle (—CO**O**H) est capable de libérer un ion hydrogène H^+. Cela signifie que l'atome d'hydrogène « quitte » la molécule en laissant son électron. Le doublet liant entre l'atome d'oxygène et l'atome d'hydrogène se transforme en doublet non liant. L'oxygène se retrouve alors

avec un électron supplémentaire : il porte donc une charge négative. La représentation de Lewis du couple acide-base de l'acide glycolique est :



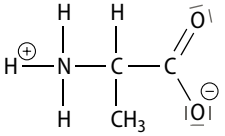
21 **1.**



2. Les acides α-aminés sont des molécules qui possèdent un groupe caractéristique acide, le groupe carboxyle (—COOH), capable de libérer un ion H^+, et un groupe caractéristique basique, le groupe amine (—NH_2), capable de capter un ion H^+.

3. Le zwittérion $CH_3—CH(NH_3^+)COO^-$ résulte d'un transfert interne de l'ion H^+ du groupe carboxyle vers le groupe amine.

4. La représentation de Lewis du zwittérion de l'alanine est :



Le groupe carboxyle (—COO**H**) cède un ion hydrogène H^+. Cela signifie que l'atome d'hydrogène « quitte » la molécule en laissant son électron. Le doublet liant entre l'atome d'oxygène et l'atome d'hydrogène se transforme en doublet non liant, l'oxygène se retrouve alors avec un électron supplémentaire : il porte donc une charge négative.
L'ion H^+ est capté par le groupe amine, le doublet non liant porté par l'atome d'azote N se transforme en doublet liant afin de former une liaison covalente entre l'azote et l'hydrogène. L'azote N se retrouve alors avec un électron en moins et porte donc une charge positive.

5.

$$\underset{\text{zwittérion}}{CH_3—CH(NH_3^+)COO^-\,(aq)} = \underset{\text{base conjuguée du zwittérion}}{CH_3—CH(NH_2)COO^-\,(aq)} + H^+$$

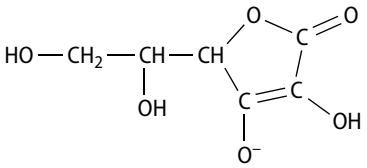
6.

$$\underset{\text{acide conjugué du zwittérion}}{CH_3—CH(NH_3^+)COOH\,(aq)} = \underset{\text{zwittérion}}{CH_3—CH(NH_3^+)COO^-\,(aq)} + H^+$$

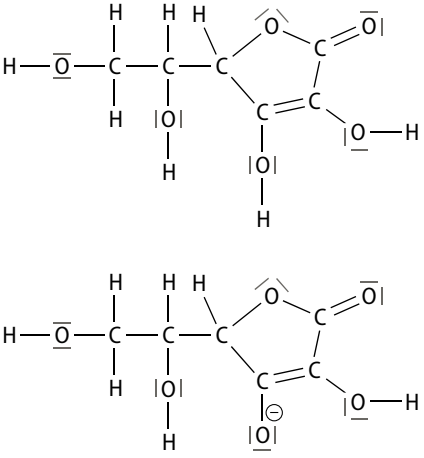
7. Les deux couples acide-base du zwittérion sont :
$CH_3—CH(NH_3^+)COO^-$ (aq) / $CH_3—CH(NH_2)COO^-$ (aq)
$CH_3—CH(NH_3^+)COOH$ (aq) / $CH_3—CH(NH_3^+)COO^-$ (aq)

8. Le zwittérion est l'acide du premier couple et la base du second couple. Le zwittérion est une espèce amphotère.

22 **1.**



2.



› 3. Les réactions acide-base

23 **1.** $CH_3NH_3^+$ (aq) + $CH_3CO_2^-$ (aq) ⇄ CH_3NH_2 (aq) + CH_3CO_2H (aq)

2. H_3O^+ (aq) + $CH_3CO_2^-$ (aq) ⇄ H_2O (ℓ) + CH_3CO_2H (aq)

3. H_2O (ℓ) + $CH_3CO_2^-$ (aq) ⇄ HO^- (aq) + CH_3CO_2H (aq)

4. CH_3CO_2H (aq) + CH_3NH_2 (aq) ⇄ $CH_3CO_2^-$ (aq) + $CH_3NH_3^+$ (aq)

5. H_3O^+ (aq) + CH_3NH_2 (aq) ⇄ H_2O (ℓ) + $CH_3NH_3^+$ (aq)

6. H_2O (ℓ) + CH_3NH_2 (aq) ⇄ HO^- (aq) + $CH_3NH_3^+$ (aq)

7. CH_3CO_2H (aq) + H_2O (ℓ) ⇄ $CH_3CO_2^-$ (aq) + H_3O+ (aq)

8. $CH_3NH_3^+$ (aq) + H_2O (ℓ) ⇄ CH_3NH_2 (aq) + H_3O^+ (aq)

9. H_2O (ℓ) + H_2O (ℓ) ⇄ HO^- (aq) + H_3O^+ (aq)

10. CH_3CO_2H (aq) + HO^- (aq) ⇄ $CH_3CO_2^-$ (aq) + H_2O (ℓ)

11. $CH_3NH_3^+$ (aq) + HO^- (aq) ⇄ CH_3NH_2 (aq) + H_2O (ℓ)

12. H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) ⇄ H_2O (ℓ) + H_2O (ℓ)

24 **1.** La formule brute du phosphate d'ammonium est $(NH_4)_3PO_4$ (s) : pour assurer la neutralité électrique du solide, il faut 3 ions NH_4^+ pour 1 ion PO_4^{3-}.

2. L'équation de dissolution du phosphate d'ammonium dans l'eau est :
$(NH_4)_3PO_4$ (s) → 3 NH_4^+ (aq) + PO_4^{3-} (aq)

3. Une solution aqueuse de cet engrais contient les ions NH_4^+ (aq) et PO_4^{3-} (aq).
NH_4^+ (aq) est l'acide du couple NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq) et PO_4^{3-} (aq) est la base du couple HPO_4^{2-} (aq) / PO_4^{3-} (aq).
Les couples mis en jeu sont :
NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq)
HPO_4^{2-} (aq) / PO_4^{3-} (aq)
Une réaction acide-base peut donc se produire entre les ions NH_4^+ (aq) et PO_4^{3-} (aq).

4. L'ion NH_4^+ (aq) cède un ion H^+ et l'ion PO_4^{3-} (aq) capte cet ion.

$$NH_4^+ (aq) = NH_3 (aq) + H^+$$
$$PO_4^{3-} (aq) + H^+ = HPO_4^{2-} (aq)$$

$$NH_4^+ (aq) + PO_4^{3-} (aq) + \cancel{H^+} \rightleftarrows NH_3 (aq) + \cancel{H^+} + HPO_4^{2-} (aq)$$

L'équation acide-base associée à cette réaction est :
$$NH_4^+ (aq) + PO_4^{3-} (aq) \rightleftarrows NH_3 (aq) + HPO_4^{2-} (aq)$$

25 **1.**
$$NH_3OHCl (s) \rightarrow \underset{\text{ion hydroxylammonium}}{NH_3OH^+ (aq)} + \underset{\text{ion chlorure}}{Cl^- (aq)}$$

2. L'ion hydroxylammonium est un acide selon la définition de Brønsted, il est capable de céder un ion H^+ :
$NH_3OH^+ (aq) = NH_3O (aq) + H^+$
La formule de l'hydroxylamine, sa base conjuguée, est NH_3O (aq).

3. L'ion hydroxylammonium étant un acide, il faut choisir le couple acide-base de l'eau dans lequel l'eau joue le rôle de la base, c'est-à-dire H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).
Les couples mis en jeu sont :
NH_3OH^+ (aq) / NH_3O (aq) et H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).
L'équation de la réaction acide-base entre l'ion hydroxylammonium et l'eau est :
$$NH_3OH^+ (aq) + H_2O (ℓ) \leftrightarrows NH_3O (aq) + H_3O^+ (aq)$$

4. D'après l'équation de la réaction acide-base entre l'ion hydroxylammonium et l'eau, des ions H_3O^+ (aq) sont créés lors de la réaction. La concentration des ions H_3O^+ (aq) augmente dans la solution. La solution aqueuse de chlorure d'hydroxylammonium est donc une solution acide.

5. L'hydroxylamine NH_3O (aq) étant une base, il faut choisir le couple acide-base de l'eau dans lequel l'eau joue le rôle de l'acide, c'est-à-dire H_2O (ℓ) / HO^- (aq).
Les couples mis en jeu sont :
NH_3OH^+ (aq) / NH_3O (aq) et H_2O (ℓ) / HO^- (aq).
L'équation de la réaction acide-base entre l'hydroxylamine et l'eau est :
$$NH_3O (aq) + H_2O (ℓ) \leftrightarrows NH_3OH^+ (aq) + HO^- (aq)$$

6. D'après l'équation de la réaction acide-base entre l'hydroxylamine et l'eau, des ions HO^- (aq) sont créés lors de la réaction. La concentration des ions HO^- (aq) augmente dans la solution, la solution aqueuse d'hydroxylamine est donc une solution basique.

26 **1.** Ce solide est composé des ions sodium Na^+ et des ions hydrogénocarbonate HCO_3^-. La formule du solide ionique est $NaHCO_3$ (s).

2. $NaHCO_3 (s) \rightarrow Na^+ (aq) + HCO_3^- (aq)$

3. Les ions présents dans l'acide chlorhydrique sont les ions chlorure Cl^- (aq) et les ions oxonium H_3O^+ (aq). Les ions responsables des brûlures d'estomac sont les ions oxonium H_3O^+ (aq) qui ont des propriétés acides.

4. Lorsqu'un patient souffrant de maux d'estomac ingère une solution d'hydrogénocarbonate de sodium, il ingère les ions Na^+ (aq) et HCO_3^- (aq). Dans l'estomac, il y a des ions oxonium H_3O^+ (aq).
HCO_3^- (aq) est la base du couple CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et H_3O^+ (aq) est l'acide du couple H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ). Une réaction acide-base peut se produire entre les ions HCO_3^- (aq) et les ions H_3O^+ (aq).

5. Les couples mis en jeu sont H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) et CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq).
L'équation acide-base associée à cette réaction est :
$$H_3O^+ (aq) + HCO_3^- (aq) \leftrightarrows H_2O (ℓ) + CO_2 (g), H_2O (ℓ)$$
D'après l'équation, on voit que les ions H_3O^+ (aq) sont consommés au cours de la réaction : les brûlures d'estomac disparaissent.

6. D'après l'équation de la réaction, on voit qu'il y a au cours de cette réaction un dégagement de dioxyde de carbone gazeux CO_2 (g), H_2O (ℓ).

7. Si on écrit l'équation de la réaction avec les ions spectateurs Na^+ (aq) et Cl^- (aq), on obtient :

$$\underset{\text{solution d'acide chlorhydrique}}{H_3O^+ (aq) + Cl^- (aq)} + \underset{\text{bicarbonate de soude}}{HCO_3^- (aq) + Na^+ (aq)}$$
$$\leftrightarrows H_2O (ℓ) + \underset{\text{solution de chlorure de sodium}}{Na^+ (aq) + Cl^- (aq)} + \underset{\text{dioxyde de carbone}}{CO_2 (g), H_2O (ℓ)}$$

Au cours de cette réaction, il y a formation de dioxyde de carbone gazeux, d'eau H_2O et des ions Na^+ (aq) et Cl^- (aq). On obtient donc une solution de chlorure de sodium et un dégagement gazeux. Tout se passe comme si une partie de l'acide chlorhydrique était remplacée par une solution de chlorure de sodium, ce qui explique la phrase du texte.

Faire le point avant d'aller plus loin p. 29

◗ ***Définir un acide et une base selon Brønsted.***
Un **acide** selon Brønsted une espèce chimique capable de **céder** un ion hydrogène H^+.
Une **base** selon Brønsted une espèce chimique capable de **capter** un ion hydrogène H^+.

◗ ***Écrire l'équation de la réaction acide-base entre l'acide propanoïque et l'eau.***

Un acide ne peut réagir qu'avec une base, donc ici l'eau joue le rôle de la base. Il faut donc choisir le couple acide-base dans lequel l'eau joue le rôle d'une base.

Les couples mis en jeu sont :

$CH_3—CH_2—CO_2H$ (aq) / $CH_3—CH_2—CO_2^-$ (aq)

H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ)

L'équation de la réaction acide-base est :

$$CH_3—CH_2—CO_2H\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows CH_3—CH_2—CO_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$$

◗ ***Expliquer pourquoi l'eau est une espèce amphotère.***

L'eau est la base du couple acide-base H_3O^+ (aq) / **H_2O (ℓ)** et l'acide du couple acide-base **H_2O (ℓ)** / HO^- (aq). L'eau est une espèce amphotère car, suivant les espèces chimiques présentes, elle se comporte soit comme une base soit comme un acide.

◗ ***Définir un couple acide-base.***

Un couple acide-base est un couple formé par deux espèces chimiques capables de se transformer l'une en l'autre par perte ou gain d'un ion hydrogène H^+. Ces deux formes sont reliées par une demi-équation acide-base :

acide = base + H^+

◗ ***Écrire la demi-équation acide-base associée au couple de l'acide éthanoïque et celle associée au couple NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq).***

Pour le couple de l'acide éthanoïque CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq), la demi-équation est :

$CH_3CO_2H\ (aq) = CH_3CO_2^-\ (aq) + H^+$

Pour le couple NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq), la demi-équation est :

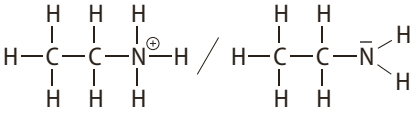
$NH_4^+\ (aq) = NH_3\ (aq) + H^+$

◗ ***Écrire la formule semi-développée et la représentation de Lewis du couple acide-base de l'éthanamine.***

Formule semi-développée du couple :

$H_3C—CH_2—NH_3^+$ / $H_3C—CH_2—NH_2$

Représentation de Lewis du couple :



◗ ***Identifier les deux couples acide-base mis en jeu dans la réaction d'équation :***

$C_6H_5NH_2\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows C_6H_5NH_3^+\ (aq) + HO^-\ (aq)$

Les couples mis en jeu sont :

$C_6H_5NH_3^+$ (aq) / $C_6H_5NH_2$ (aq)

H_2O (ℓ) / HO^- (aq)

◗ ***Montrer que la réaction acide-base suivante se modélise par un transfert d'ion hydrogène H^+ entre deux espèces appartenant à deux couples acide-base différents.***

$CH_3CO_2H\ (aq) + C_2H_5NH_2\ (aq) \rightarrow CH_3CO_2^-\ (aq) + C_2H_5NH_3^+\ (aq)$

Les couples mis en jeu sont :

CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq)

$C_2H_5NH_3^+$ (aq) / $C_2H_5NH_2$ (aq)

Les demi-équations acide-base sont :

$CH_3CO_2H\ (aq) = CH_3CO_2^-\ (aq) + H^+$

(CH_3CO_2H (aq) cède un ion H+)

$C_2H_5NH_2\ (aq) + H^+ = C_2H_5NH_3^+\ (aq)$

($C_2H_5NH_2$ (aq) capte un ion H^+)

$$CH_3CO_2H\ (aq) + C_2H_5NH_2\ (aq) + \cancel{H^+} \rightarrow CH_3CO_2^-\ (aq) + C_2H_5NH_3^+\ (aq) + \cancel{H^+}$$

L'équation est alors :

$$CH_3CO_2H\ (aq) + C_2H_5NH_2\ (aq) \rightarrow CH_3CO_2^-\ (aq) + C_2H_5NH_3^+\ (aq)$$

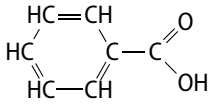
On peut modéliser cette réaction par un **transfert d'ion hydrogène H^+** entre CH_3CO_2H (aq) et $C_2H_5NH_2$ (aq).

Exercices similaires aux exercices résolus

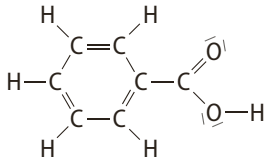
▮ *p. 30 et 31*

28 **1.** Les atomes de carbone ($Z = 6$: $1s^2\ 2s^2\ 2p^2$) et d'hydrogène ($Z = 1$: $1s^1$) peuvent former une seule liaison covalente et ne possèdent pas de doublet non liant. L'atome d'oxygène ($Z = 8$: $1s^2\ 2s^2\ 2p^4$) peut former deux liaisons covalentes et possède deux doublets non liants.

Formule semi-développée :



Représentation de Lewis :



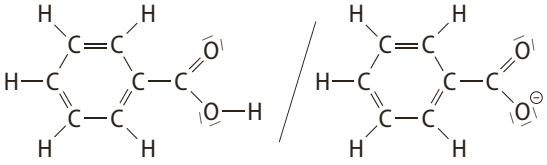
2. L'acide benzoïque est un acide carboxylique, le groupe carboxyle —COOH est capable de céder un ion hydrogène H^+, sa demi-équation acide-base est :

$C_6H_5CO_2H = C_6H_5CO_2^- + H^+$

Sa forme conjuguée est une base, c'est l'ion benzoate $C_6H_5CO_2^-$.

3. Lorsque l'acide $C_6H_5CO_2H$ perd l'ion H^+, pour former sa base conjuguée, le doublet liant entre l'atome d'oxygène O et l'hydrogène H se transforme en doublet **non liant**, puisque l'atome H part en laissant son électron.

L'oxygène O se retrouve alors avec un électron en plus et porte donc une charge négative.
Le schéma de Lewis du couple acide-base est :



acide benzoïque ion benzoate

30 **1.** L'équation de dissolution dans l'eau de l'hydrogénocarbonate de sodium s'écrit :
$NaHCO_3\,(s) \rightarrow Na^+\,(aq) + HCO_3^-\,(aq)$

2. Pour diminuer l'acidité, l'acide AH présent dans le plat doit réagir avec une base.
L'ion hydrogénocarbonate est une espèce amphotère HCO_3^- (aq), il appartient aux couples :
$CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell)$ / **HCO_3^- (aq)** et **HCO_3^-** (aq) / CO_3^{2-} (aq)
On doit considérer, dans ce cas, le couple dans lequel il joue le rôle de la base, soit le couple $CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell) / HCO_3^-\,(aq)$.
Lorsque l'on ajoute de l'hydrogénocarbonate de sodium, la réaction ci-après se déroule, les deux couples mis en jeu étant :

$$\begin{array}{rcl} \text{AH (aq)} & / & A^-\,(aq) \\ CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell) & / & HCO_3^-\,(aq) \\ \text{AH (aq)} & = & A^-\,(aq) + H^+ \\ HCO_3^-\,(aq) + H^+ & = & CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell) \end{array}$$

$$\text{AH (aq)} + HCO_3^-\,(aq) \rightleftarrows A^-\,(aq) + CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell)$$

L'ajout d'hydrogénocarbonate de sodium permet de transformer l'acide AH en sa base conjuguée A^- (aq). On obtient aussi du dioxyde de carbone dissous en solution qui s'échappera ensuite sous forme de molécule gazeuse CO_2 (g). Ce changement d'état se fera plus facilement si la solution est chauffée.

S'entraîner pour maîtriser *p. 32*

31 **1.** La formule de l'ion ascorbate est $C_6H_7O_6^-$ (aq).
Le couple acide-base s'écrit :
$C_6H_8O_6\,(aq) / C_6H_7O_6^-\,(aq)$.

2. $NaHCO_3\,(s) \rightarrow Na^+\,(aq) + HCO_3^-\,(aq)$

3. L'ion HCO_3^- appartient aux couples acide-base :
$CO_2\,(g), H_2O\,(\ell) / HCO_3^-\,(aq)$ et $HCO_3^-\,(aq) / CO_3^{2-}\,(aq)$.

4. Un acide ne peut réagir qu'avec une base. Donc ici, les deux réactifs de la réaction sont l'acide ascorbique $C_6H_8O_6$ (aq) et l'ion HCO_3^- (aq), base du couple $CO_2\,(g), H_2O\,(\ell) / HCO_3^-\,(aq)$.
Les couples acide-base mis en jeu sont :
$C_6H_8O_6\,(aq) / C_6H_7O_6^-\,(aq)$
$CO_2\,(g), H_2O\,(\ell) / HCO_3^-\,(aq)$

5. $C_6H_8O_6 + HCO_3^- \rightarrow C_6H_7O_6^- + CO_2\,(g), H_2O\,(\ell)$
Le gaz produit est du dioxyde de carbone.

32 **1.** Le catabolisme est l'ensemble des réactions de dégradation des molécules. La dégradation des protéines produit des amines nauséabondes (odeurs très désagréables) et volatiles (qui s'évaporent très facilement).

2. a. $HCl\,(g) + NH_3\,(g) \rightarrow NH_4Cl\,(s)$
NH_4Cl (s) est le chlorure d'ammonium (solide ionique inodore).

b. Les couples acide-base mis en jeu sont NH_4^+ / NH_3 et HCl / Cl^-.

3. a. Les amines sont des bases selon Brønsted, elles captent un ion H^+ et l'acide chlorhydrique est un acide qui cède un ion H^+. L'équation de la réaction acide-base entre le chlorure d'hydrogène et les amines s'écrit :
$HCl\,(g) + R{-}NH_2\,(g) \rightarrow R{-}NH_3Cl\,(s)$ (solides inodores)

b. Les couples acide-base mis en jeu sont :
$R{-}NH_3^+ / R{-}NH_2$ et HCl / Cl^-.

c. Les mauvaises odeurs sont dues aux amines volatiles $R{-}NH_2$ (g). Grâce au chlorure d'hydrogène, elles se transforment en solides ioniques inodores $R{-}NH_3Cl$ (s). Les mauvaises odeurs disparaissent donc.

33 **1.** Son pH devrait être égal à 7 puisque l'eau distillée est une solution qui a subi une distillation et qui, en théorie, doit être dépourvue de sels minéraux, c'est-à-dire d'ions en solution.

2. Les couples mis en jeu sont CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).
Le dioxyde de carbone dissous réagit avec l'eau, l'équation de la réaction est :
$CO_2\,(g), H_2O\,(\ell) + H_2O\,(\ell) \rightarrow HCO_3^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$
On voit que cette réaction produit des ions H_3O^+ (aq), donc la solution devient de plus en plus acide, ce qui explique la diminution du pH.

34 ***L'hélianthine***

Un indicateur coloré acido-basique est un couple acide-base dans lequel les deux éléments associés n'ont pas la même couleur. L'hélianthine est un indicateur de pH qui est rouge sous sa forme acide HIn (aq) et jaune sous sa forme basique In^- (aq).

***1.** De l'hélianthine sous sa forme acide est versée dans un bécher contenant une solution d'hydroxyde de sodium.*

***a.** Identifier les couples acide-base mis en jeu et écrire l'équation de la réaction acide-base se produisant dans le bécher.*

***b.** Que devient la couleur de la solution ? Justifier.*

2. *Une solution d'acide chlorhydrique est ensuite versée dans le même bécher.*
a. *Que devient la couleur de la solution ?*
b. *Écrire l'équation de la réaction acide-base qui explique ce changement de couleur.*

1. a. Les couples acide-base mis en jeu sont :
$HIn\,(aq)$ / $In^-\,(aq)$ et $H_2O\,(\ell)$ / $HO^-\,(aq)$
L'équation de la réaction acide-base qui a lieu dans le bécher est :
$HIn\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow In^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
b. L'espèce acide HIn (aq) de couleur rouge se transforme en sa base conjuguée In^- (aq) de couleur jaune. La solution devient donc jaune.

2. a. La couleur de la solution, initialement jaune à cause des ions In^- (aq) devient rouge puisqu'on rajoute de l'acide, c'est-à-dire que l'on transforme l'ion In^- (aq) en son acide conjugué HIn (aq).
b. Les couples mis en jeu sont HIn (aq) / In^- (aq) et $H_3O^+\,(aq)$ / $H_2O\,(\ell)$. L'équation de la réaction acide-base qui a lieu dans le bécher est :
$In^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq) \rightarrow HIn\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
La base conjuguée In^- (aq) de couleur jaune se transforme en son acide conjugué HIn (aq), de couleur rouge.

35 › Démarche experte

1. Les couples mis en jeu sont :
$CO_2\,(aq)$, $H_2O\,(\ell)$ / $HCO_3^-\,(aq)$
$H_3O^+\,(aq)$ / $H_2O\,(\ell)$
Le CO_2 dissous réagit avec l'eau selon l'équation :
$CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows H_3O^+\,(aq) + HCO_3^-\,(aq)$
Cette réaction produit la formation d'ions H_3O^+ (aq), la concentration en ions H_3O^+ (aq) augmente, la solution devient de plus en plus acide et le pH diminue.

2. Les couples mis en jeu sont :
$CO_2\,(aq)$, $H_2O\,(\ell)$ / $HCO_3^-\,(aq)$
$HClO\,(aq)$ / $ClO^-\,(aq)$
Le CO_2 dissous réagit avec l'ion hypochlorite ClO^- (aq) selon l'équation :
$CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell) + ClO^-\,(aq) \rightleftarrows HCO_3^-\,(aq) + HClO\,(aq)$
D'après l'équation de la réaction, on voit que la formation d'acide hypochloreux HClO (aq) est favorisée. HClO (aq) est un désinfectant plus efficace que l'ion hypochlorite ClO^- (aq) car il possède un pouvoir bactéricide plus important. La dissolution du dioxyde de carbone rend donc la désinfection plus efficace.

› Démarche avancée

1. a. Les couples mis en jeu sont :
$CO_2\,(aq)$, $H_2O\,(\ell)$ / $HCO_3^-\,(aq)$
$H_3O^+\,(aq)$ / $H_2O\,(\ell)$
Le CO_2 dissous réagit avec l'eau selon l'équation :
$CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows H_3O^+\,(aq) + HCO_3^-\,(aq)$
b. Cette réaction produit la formation d'ions $H_3O^+\,(aq)$, la concentration en ions $H_3O^+\,(aq)$ augmente, la solution devient de plus en plus acide et le pH diminue.

2. a. Les couples mis en jeu sont :
$CO_2\,(aq)$, $H_2O\,(\ell)$ / $HCO_3^-\,(aq)$
$HClO\,(aq)$ / $ClO^-\,(aq)$
Le CO_2 dissous réagit avec l'ion hypochlorite ClO^- (aq) selon l'équation :
$CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell) + ClO^-\,(aq) \rightleftarrows HCO_3^-\,(aq) + HClO\,(aq)$
b. D'après l'équation de la réaction, on voit que la formation d'acide hypochloreux HClO (aq) est favorisée. HClO (aq) est un désinfectant plus efficace que l'ion hypochlorite ClO^- (aq) car il possède un pouvoir bactéricide plus important. La dissolution du dioxyde de carbone rend donc la désinfection plus efficace.

36 **1.** $C_5H_4N_4O_3\,(s) = C_5H_3N_4O_3^-\,(aq) + H^+\,(aq)$

2. a. L'espèce ionique majoritaire dans l'eau de Vichy est l'ion hydrogénocarbonate $HCO_3^-\,(aq)$.
b. L'ion $HCO_3^-\,(aq)$ appartient aux couples acide-base :
$CO_2\,(g)$, $H_2O\,(\ell)$ / $HCO_3^-\,(aq)$ et $HCO_3^-\,(aq)$ / $CO_3^{2-}\,(aq)$.

3. a. Les ions $HCO_3^-\,(aq)$ doivent réagir avec l'acide urique.

b. Il faut donc choisir le couple dans lequel l'ion $HCO_3^-\,(aq)$ joue le rôle d'une base.
Les couples mis en jeu sont $C_5H_4N_4O_3\,(s)$ / $C_5H_3N_4O_3^-$ (aq) et $CO_2\,(g)$, $H_2O\,(\ell)$ / $HCO_3^-\,(aq)$.
L'équation de la réaction acide-base est :
$C_5H_4N_4O_3\,(s) + HCO_3^-\,(aq) \leftrightarrows C_5H_3N_4O_3^-\,(aq) + CO_2\,(g), H_2O\,(\ell)$
Si le patient consomme de l'eau de Vichy, les ions $HCO_3^-\,(aq)$ peuvent réagir avec l'acide urique solide $C_5H_4N_4O_3\,(s)$. Cet acide solide, insoluble en solution aqueuse, se transforme en ion urate soluble $C_5H_3N_4O_3^-\,(aq)$. La consommation d'eau de Vichy peut donc aider à la dissolution d'un calcul d'acide urique.

4. Le pH des urines est de 6,8, voisin de 7. Alors 95 % de l'acide urique est sous la forme de sa base conjuguée. C'est l'ion urate $C_5H_3N_4O_3^-\,(aq)$ qui est prédominant dans les urines.

5. a. Les couples acide-base mis en jeu lors de cette réaction sont $C_5H_4N_4O_3\,(s)$ / $C_5H_3N_4O_3^-\,(aq)$ et $H_3O^+\,(aq)$ / $H_2O\,(\ell)$.
b. Les demi-équations acide-base sont :
$C_5H_3N_4O_3^-\,(aq) + H^+ = C_5H_4N_4O_3\,(s)$
$H_3O^+\,(aq) = H_2O\,(\ell) + H^+$
L'équation modélisant cette transformation supposée totale est :
$C_5H_3N_4O_3^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq) \rightarrow C_5H_4N_4O_3\,(s) + H_2O\,(\ell)$

c.

Équation de la réaction		$C_5H_3N_4O_3^-$ (aq) + H_3O^+ (aq) → $C_5H_3N_4O_3$ (s) + H_2O (ℓ)			
État	**Avancement**	**Quantités de matières dans le système** (en mol)			
initial	$x = 0$	$n_i(C_5H_3N_4O_3^-$ (aq))	$n_i(H_3O^+$ (aq))	0	0
en cours	x	$n_i(C_5H_3N_4O_3^-$(aq)) – x	$n_i(H_3O^+$ (aq)) – x	x	x
final	x_f	$n_i(C_5H_3N_4O_3^-$ (aq)) – x_f	$n_i(H_3O^+$ (aq)) – x_f	x_f	x_f

$n_i(H_3O^+\text{ (aq)}) = c_A \cdot V_A$
$= 2{,}00 \times 10^{-2} \times 10{,}2 \times 10^{-3}$
$= 2{,}04 \times 10^{-4}$ mol

À l'état final, $n_f(H_3O^+\text{ (aq)}) = 0$ et $n_f(C_5H_3N_4O_3^-\text{ (aq)}) = 0$.
Les réactifs ont disparu, donc :
$n_i(H_3O^+\text{ (aq)}) - x_f = 0$
$x_f = n_i(H_3O^+\text{ (aq)}) = 2{,}04 \times 10^{-4}$ mol

d. • *Calcul de la quantité de matière d'ions urate contenue dans V = 50,0 mL d'urine :*
D'après le tableau d'avancement :
$n_f(C_5H_3N_4O_3^-\text{ (aq)}) = 0$, donc $n_i(C_5H_3N_4O_3^-\text{ (aq)}) - x_f = 0$.
$n_i(C_5H_3N_4O_3^-\text{ (aq)}) - 2{,}04 \times 10^{-4} = 0$, donc :
$n_i(C_5H_3N_4O_3^-\text{ (aq)}) = 2{,}04 \times 10^{-4}$ mol

• *Calcul de la quantité de matière d'ions urate contenue dans la totalité des urines du patient :*
Dans 50,0 mL, il y a $2{,}04 \times 10^{-4}$ mol d'ions urate.
Dans 1,50 L = $1{,}50 \times 10^3$ mL, il y a 30 fois plus d'ions urate, donc :
$n(C_5H_3N_4O_3^-\text{ (aq)}) = 30 \times 2{,}04 \times 10^{-4}$
$= 6{,}12 \times 10^{-3}$ mol d'ions urate dans la totalité des urines.

e. $n(C_5H_3N_4O_3^-\text{ (aq)}) = n(C_5H_4N_4O_3\text{ (s)})$
$m(C_5H_4N_4O_3H\text{ (s)}) = n(C_5H_4N_4O_3\text{ (s)}) \cdot M(C_5H_4N_4O_3\text{ (s)})$
$m(C_5H_4N_4O_3H\text{ (s)}) = 6{,}12 \times 10^{-3} \times (5 \times 12{,}0 + 4 \times 1{,}0$
$+ 4 \times 14{,}0 + 3 \times 16{,}0)$
$= 6{,}12 \times 10^{-3} \times 168 = 1{,}028$ g
$m_{\text{acide urique}} = m(C_5H_4N_4O_3H\text{ (s)}) = 1{,}03$ g
$= 1{,}03 \times 10^3$ mg

f. $\left(\dfrac{u_{m_{\text{acide urique}}}}{m_{\text{acide urique}}}\right)^2 = \left(\dfrac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\dfrac{u_{c_A}}{c_A}\right)^2$

D'où :
$$\frac{u_{m_{\text{acide urique}}}}{m_{\text{acide urique}}} = \sqrt{\left(\frac{0{,}1}{10{,}2}\right)^2 + \left(\frac{0{,}02}{2{,}00}\right)^2} = 0{,}014$$
$u_{m_{\text{acide urique}}} = 0{,}014 \times 1{,}03 = 0{,}01$ g
$m_{\text{acide urique}} = (1{,}03 \pm 0{,}01)$ g

g. $m_{\text{acide urique}} = 1{,}03\text{ g} = 1{,}03 \times 10^3\text{ mg} > 750$ mg
L'uricémie du patient n'est pas normale, elle est supérieure au taux maximal.

h. Si l'alimentation favorise une diminution du pH des urines, les ions urate $C_5H_3N_4O_3^-$ (aq) peuvent se transformer en acide urique $C_5H_4N_4O_3$ (s), insoluble en solution aqueuse, et le risque de formation de cristaux d'acide urique augmente.

37 Exemple d'exposé oral

• *Pourquoi le pH diminue-t-il lorsqu'on fréquente beaucoup la piscine ?*
Lorsque l'eau est agitée, elle est en contact avec une plus grande quantité d'air, ce qui favorise la **dissolution** du dioxyde de carbone. Les **couples acide-base mis en jeu** sont :
CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).
Le CO_2 dissous réagit avec l'eau selon l'équation :
$CO_2\text{ (g)} + H_2O\text{ (ℓ)} + H_2O\text{ (ℓ)} \leftrightarrows H_3O^+\text{ (aq)} + HCO_3^-\text{ (aq)}$
Cette **réaction acide-base** produit des ions H_3O^+ (aq), la **concentration en ions H_3O^+ (aq)** augmente, la solution devient de plus en plus acide et le pH diminue.

• *Quel est le rôle des deux produits d'entretien ?*
Le produit « pH-moins » contient de l'hydrogénosulfate de sodium, un solide ionique de formule $NaHSO_4$ (s). Son équation de dissolution dans l'eau est :
$NaHSO_4\text{ (s)} \rightarrow Na^+\text{ (aq)} + HSO_4^-\text{ (aq)}$
Lorsqu'on met du produit « pH-moins » dans l'eau de la piscine, on libère des ions HSO_4^- (aq), acide du couple HSO_4^- (aq) / SO_4^{2-} (aq). Cet acide réagit avec l'eau.
Les couples mis en jeu sont : HSO_4^- (aq) / SO_4^{2-} (aq) et H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).
L'équation acide-base s'écrit :
$HSO_4^-\text{ (aq)} + H_2O\text{ (ℓ)} \leftrightarrows SO_4^{2-}\text{ (aq)} + H_3O^+\text{ (aq)}$
Lorsqu'on ajoute le solide ionique $NaHSO_4$ (s) dans l'eau, il y a **formation d'ions H_3O^+ (aq)**, la concentration en ions H_3O^+ (aq) augmente donc le pH diminue, d'où l'appellation « pH-moins ».
Le produit « pH-plus » contient du carbonate de sodium, un solide ionique de formule Na_2CO_3 (s). Son équation de dissolution dans l'eau est :
$Na_2CO_3\text{ (s)} \rightarrow 2\ Na^+\text{ (aq)} + CO_3^{2-}\text{ (aq)}$
Lorsqu'on met du produit « pH-plus » dans l'eau de la piscine, on libère des ions CO_3^{2-} (aq), base du couple HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq). Cette base réagit avec l'eau.

Les couples mis en jeu sont :
HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq) et H_2O (ℓ) / HO^- (aq).
L'équation acide-base s'écrit :
CO_3^{2-} (aq) + H_2O (ℓ) ⇆ HCO_3^- (aq) + HO^- (aq)
Lorsqu'on ajoute le solide ionique Na_2CO_3 (s) dans l'eau, il y a formation d'ions HO^- (aq), la concentration en ions HO^- (aq) augmente donc le pH augmente, d'où l'appellation « pH-plus ».

38 Exemple d'exposé oral
Le citron contient de l'acide citrique $C_6H_8O_7$ (aq). Les couples mis en jeu sont : $C_6H_8O_7$ (aq) / $C_6H_7O_7^-$ (aq) et CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq). L'équation de la réaction acide-base qui se produit entre l'acide citrique présent dans le citron et les ions hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) présents dans l'eau minérale est :
$C_6H_8O_7$ (aq) + HCO_3^- (aq)
→ $C_6H_7O_7^-$ (aq) + CO_2 (g), H_2O (ℓ)
Du dioxyde de carbone gazeux se forme et on voit apparaître des bulles.

Développer ses compétences p. 35

39 › Questions préliminaires
1. Le carbonate de calcium (calcite) présent dans les roches calcaires a pour formule $CaCO_3$ (s). Il est très peu soluble dans l'eau. Il est constitué des ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} :
$CaCO_3$ (s) → Ca^{2+} (aq) + CO_3^{2-} (aq)
L'ion carbonate est la base du couple HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq). Dans l'eau, il y a du dioxyde de carbone dissous CO_2 (g), H_2O (ℓ), qui est l'acide du couple CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq).
Une réaction acide-base se déroule entre les ions carbonate CO_3^{2-} (aq) et le dioxyde de carbone dissous dans l'eau CO_2 (g), H_2O (ℓ) selon l'équation :
CO_3^{2-} (aq) + CO_2 (g), H_2O (ℓ) ⇆ 2 HCO_3^- (aq)
Si on écrit l'équation avec le carbonate de calcium :
$CaCO_3$ (s) + CO_2 (g), H_2O (ℓ) ⇆ Ca^{2+} (aq) + 2 HCO_3^- (aq)
On constate que le carbonate de calcium solide $CaCO_3$ (s) disparaît de la roche. Des ions calcium Ca^{2+} (aq) passent en solution et l'eau de ruissellement s'enrichit en ions hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq). On obtient de l'hydrogénocarbonate de calcium soluble dans l'eau. L'eau creuse progressivement et lentement des fissures, qui se transformeront en grottes, cavernes ou gouffres.

2. a. Ce sont les ions calcium Ca^{2+} (aq) et les ions hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq).
b. L'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) est une espèce amphotère, car il est la base du couple acide-base CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et l'acide du couple HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq). Deux ions HCO_3^- (aq) peuvent réagir ensemble, un ion HCO_3^- (aq) jouera le rôle de l'acide et l'autre ion HCO_3^- (aq) jouera le rôle de la base. Les couples mis en jeu sont CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq).
L'équation de la réaction est :
HCO_3^- (aq) + HCO_3^- (aq) ⇆ CO_3^{2-} (aq) + CO_2 (g), H_2O (ℓ)
c. Si l'on écrit la réaction précédente avec les ions calcium Ca^{2+} (aq) qui sont présents dans les eaux de ruissellement :
Ca^{2+} (aq) + HCO_3^- (aq) + HCO_3^- (aq)
⇆ Ca^{2+} (aq) + CO_3^{2-} (aq) + CO_2 (g), H_2O (ℓ)
Comme le carbonate de calcium est quasiment insoluble, les ions Ca^{2+} (aq) et CO_3^{2-} (aq) ne coexistent pas en solution et il se forme du $CaCO_3$ (s) :
Ca^{2+} (aq) + HCO_3^- (aq) + HCO_3^- (aq)
solution d'hydrogénocarbonate de calcium
⇆ $CaCO_3$ (s) (carbonate de calcium) + CO_2 (g), H_2O (ℓ) (dioxyde de carbone)
D'après le doc. 3, l'eau s'évapore lentement et le dioxyde de carbone CO_2 (g) quitte progressivement la solution pour se dégager dans l'atmosphère. L'hydrogénocarbonate de calcium initialement présent dans la goutte se transforme en carbonate de calcium $CaCO_3$ (s) qui se dépose car il est insoluble dans l'eau. Les dépôts successifs de carbonate de calcium forment progressivement une stalactite.

› Le problème à résoudre
• *Calcul de la hauteur totale de précipitations en mm sur l'année 2015 :*
h = 60 + 55 + 58 + 85 + 90 + 80 + 55 + 60 + 80 + 80 + 75 + 70 = 848 mm

• *Calcul de la surface correspondant à l'ouverture du gouffre :*
$S = \pi \cdot R^2$ avec R = 35/2 = 17,5 m
$S = \pi \times 17{,}5^2 = 962$ m^2 = $9{,}6 \times 10^2$ m^2

• *Calcul du volume d'eau qui tombe sur la surface correspondant à l'ouverture du gouffre en 1 an :*
D'après le doc. 4, 848 mm de précipitations équivalent à 848 L d'eau de pluie par m^2 au sol.
V(eau de pluie) = $848 \times 9{,}6 \times 10^2 = 815\,871$ L (valeur trouvée en conservant tous les chiffres significatifs de S dans la calculatrice).
Soit V(eau de pluie) = $8{,}2 \times 10^5$ L (avec 2 chiffres significatifs).

• *Calcul du volume d'eau qui s'infiltre à travers la surface correspondant à l'ouverture du gouffre en 1 an :*
On sait que 70 % des précipitations s'infiltrent dans la roche, donc :

$$V(\text{eau qui s'infiltre}) = \frac{70}{100} \times V(\text{eau de pluie})$$

$$V(\text{eau qui s'infiltre}) = \frac{70}{100} \times 8{,}2 \times 10^5$$
$$= 5{,}7 \times 10^5 \text{ L}$$

• *Calcul de la quantité de matière de carbonate de calcium dissoute dans le volume d'eau qui s'infiltre en 1 an :*

La solubilité du carbonate de calcium dans l'eau étant 3 mmol · L^{-1}, on a :

$n(CaCO_3\ (s)) = 3 \times 10^{-3} \times 5{,}7 \times 10^5 = 1\ 713$

$= 2 \times 10^3$ mol (avec 1 chiffre significatif)

• *Calcul de la masse de carbonate de calcium dissoute en 1 an :*

$m(CaCO_3\ (s)) = n(CaCO_3\ (s)) \cdot M(CaCO_3\ (s))$

$m(CaCO_3\ (s)) = 2 \times 10^3 \times 100{,}1 = 2 \times 10^5$ g

• *Calcul du volume occupé par la masse de carbonate de calcium dissoute en 1 an :*

$V(CaCO_3\ (s)) = \dfrac{m(CaCO_3(s))}{\rho(CaCO_3(s))}$ avec :

$\rho(CaCO_3(s)) = 2{,}7 \times 10^3$ kg · $m^{-3} = 2{,}7 \times 10^6$ g · m^{-3}

$V(CaCO_3\ (s)) = \dfrac{2 \times 10^5}{2{,}7 \times 10^6} = 0{,}063\ m^3 = 6 \times 10^{-2}\ m^3$

(en conservant tous les chiffres significatifs de m dans la calculatrice).

• *Calcul du volume du gouffre de Padirac :*

$V_{gouffre} = \pi \cdot R^2 \cdot h$ avec $R = 35/2 = 17{,}5$ m et $h = 103$ m

$V_{gouffre} = \pi \times 17{,}5^2 \times 103 = 9{,}9 \times 10^4\ m^3$

• *Calcul de la durée de la formation du gouffre :*

$$t = \frac{V_{gouffre}}{V(CaCO_3\ (s))}$$

$$= \frac{9{,}9 \times 10^4}{6 \times 10^{-2}} = 1{,}7 \times 10^6 = 2 \times 10^6 \text{ années}$$

La durée de formation du gouffre est d'environ 2 millions d'années.

40 › Questions préliminaires

1. • *Calcul de la quantité de matière d'acide chlorhydrique présente dans 100 g de solution détartrante :*

$$n(HCl) = \frac{m(HCl)}{M(HCl)} = \frac{9{,}0}{36{,}5} = 0{,}25 \text{ mol}$$

• *Calcul du volume de 100 g de solution commerciale :*

$\rho_d = \dfrac{m}{V}$ donc $V = \dfrac{m}{\rho_d}$.

$$V = \frac{100}{1{,}04 \times 10^3} = 9{,}6 \times 10^{-2}\ L$$

• *Calcul de la concentration en quantité de matière d'acide chlorhydrique de la solution commerciale :*

$$c = \frac{n(HCl)}{V} = \frac{0{,}25}{9{,}6 \times 10^{-2}} = 2{,}6 \text{ mol} \cdot L^{-1}$$

2. a. On mélange une solution d'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) avec une solution d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)). Les deux espèces chimiques qui possèdent des propriétés acide-base sont H_3O^+ (aq) et HO^- (aq). Les couples mis en jeu sont H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) ; H_2O (ℓ) / HO^- (aq).

L'équation de la réaction est :

H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) → 2 H_2O (ℓ)

On met une flèche simple car la réaction est totale.

b. $$[H_3O^+\ (aq)] = \frac{n(H_3O^+\ (aq))}{V_S}$$

$$[H_3O^+\ (aq)] = \frac{1{,}2 \times 10^{-3}}{10{,}0 \times 10^{-3}} = 1{,}2 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot L^{-1}$$

La solution commerciale a été diluée 20 fois, donc la concentration en quantité de matière d'ions H_3O^+ (aq) de la solution commerciale est :

$[H_3O^+\ (aq)]_{com} = 20 \times [H_3O^+\ (aq)]$

$[H_3O^+\ (aq)]_{com} = 20 \times 1{,}2 \times 10^{-1} = 2{,}4 \text{ mol} \cdot L^{-1}$

La concentration c en quantité de matière d'acide chlorhydrique de la solution commerciale de détartrant est $c = 2{,}4$ mol · L^{-1}. À la question 1, on a trouvé $c = 2{,}6$ mol · L^{-1}

L'écart relatif est donc $\left|\dfrac{2{,}6 - 2{,}4}{2{,}6}\right| \times 100 = 7{,}7$ %.

C'est un écart relatif assez important (> 5 %), mais le résultat trouvé reste compatible avec la valeur trouvée à la question 1.

› Le problème à résoudre

On considère que la concentration en quantité de matière en ions H_3O^+ (aq) de la solution commerciale est égale à 2,6 mol · L^{-1}.

• *Calcul du volume de tartre :*

$V(CaCO_3) = S \cdot e = (2\pi \cdot R^2 + 2\pi \cdot R \cdot h) \cdot e$

avec $R = h = 0{,}40$ m et $e = 10 \times 10^{-6}$ m

$V(CaCO_3) = (2\pi \times 0{,}40^2 + 2\pi \times 0{,}40 \times 0{,}40) \times 10 \times 10^{-6}$

$V(CaCO_3) = 2{,}0 \times 10^{-5}\ m^3$

• *Calcul de la masse de tartre :*

$m(CaCO_3) = \rho(CaCO_3) \cdot V(CaCO_3)$

$m(CaCO_3) = 2{,}65 \times 10^6 \times 2{,}0 \times 10^{-5} = 53$ g

• *Calcul de la quantité de matière de tartre :*

$$n(CaCO_3) = \frac{m(CaCO_3)}{M(CaCO_3)}$$

$$n(CaCO_3) = \frac{53}{100{,}1} = 0{,}53 \text{ mol}$$

• *Calcul de la quantité de matière d'ions H_3O^+ (aq) présente dans 750 mL de solution commerciale de concentration 2,6 mol · L^{-1} :*

$n(H_3O^+\ (aq)_{com} = c \cdot V$

$n(H_3O^+\ (aq))_{com} = 2{,}6 \times 750 \times 10^{-3} = 2{,}0$ mol

• *Calcul de la quantité d'ions H_3O^+ (aq) nécessaire pour faire disparaître tout le calcaire :*

D'après l'équation de la réaction (doc. 3) :

$n(H_3O^+)_{nécessaire} = 2 \times n(CaCO_3)_{présents\ sur\ le\ tambour}$

$= 2 \times 0{,}53 = 1{,}1$ mol

• *Conclusion :*

$n(H_3O^+)_{nécessaire} = 1{,}1 \text{ mol} < n(H_3O^+\ (aq))_{com} = 2{,}0$ mol

Le flacon de 750 mL est suffisant pour détartrer le tambour.

41 › Analyse

1. L'hydrogénocarbonate de sodium $NaHCO_3$ (s) est insoluble dans l'huile mais soluble dans l'eau. Lorsque la goutte de vinaigre (solution aqueuse d'acide éthanoïque) touche le fond du récipient, le bicarbonate $NaHCO_3$ (s) se dissout à l'intérieur, selon l'équation de dissolution :

$NaHCO_3\,(s) \rightarrow Na^+\,(aq) + HCO_3^-\,(aq)$

L'ion HCO_3^- (aq) est la base du couple CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et l'acide éthanoïque CH_3CO_2H (aq) est l'acide du couple CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq).

Les couples acide-base mis en jeu sont :

CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq)

CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq)

Une réaction acide-base a lieu entre les deux espèces chimiques :

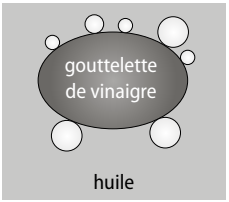
$CH_3CO_2H\,(aq) + HCO_3^-\,(aq) \rightarrow CH_3CO_2^-\,(aq) + CO_2\,(aq), H_2O\,(ℓ)$

Si l'on écrit l'équation avec les ions spectateurs Na^+ (aq), l'équation de la transformation chimique qui a lieu entre le vinaigre et le bicarbonate de soude est :

$CH_3CO_2H\,(aq) + NaHCO_3\,(s) \rightarrow CH_3CO_2^-\,(aq) + Na^+\,(aq) + CO_2\,(aq), H_2O\,(ℓ)$

Le gaz qui se dégage est du dioxyde de carbone CO_2 (g).

2. Les bulles de dioxyde de carbone se forment à l'interface gouttelette de vinaigre/hydrogénocarbonate de sodium. Elles se répartissent ensuite sur la surface de la gouttelette.



L'huile et le vinaigre ne sont pas miscibles. Au début de l'expérience, les gouttelettes de vinaigre descendent au fond du récipient car la densité du vinaigre (d = 1,0) est supérieure à la densité de l'huile (d = 0,92).

Lorsque les gouttelettes de vinaigre touchent le fond du récipient, l'acide éthanoïque CH_3CO_2H (aq) et les ions hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) réagissent pour former du dioxyde de carbone. Les bulles de gaz se forment et s'accrochent tout autour des gouttelettes de vinaigre. Le volume des bulles de gaz augmente progressivement jusqu'à ce que les bulles remontent à la surface en entraînant avec elles les gouttelettes de vinaigre.

À la surface, les bulles de gaz éclatent, les gouttelettes de vinaigre redescendent donc dans l'huile au fond du récipient. Et ainsi de suite…

3. On établit le tableau d'avancement :

Équation :		$CH_3CO_2H\,(aq)$ + $NaHCO_3\,(s)$ → $CH_3CO_2^-\,(aq)$ + $Na^+\,(aq)$ + $CO_2\,(g), H_2O\,(ℓ)$				
État		**Quantités de matière dans le système** (en mol)				
initial	$x = 0$	$n_i(CH_3CO_2H)$	$n_i(NaHCO_3)$	0	0	0
en cours	x	$n_i(CH_3CO_2H) - x$	$n_i(NaHCO_3) - x$	x	x	x
final	x_f	$n_i(CH_3CO_2H) - x_f$	$n_i(NaHCO_3) - x_f$	x_f	x_f	x_f

Déterminons l'avancement maximal x_f.

− Si l'hydrogénocarbonate de sodium est le réactif limitant : $n_i(NaHCO_3) - x_f = 0$.

$$n_i(NaHCO_3) = \frac{m(NaHCO_3)}{M(NaHCO_3)}$$

soit $n_i(NaHCO_3) = \dfrac{5{,}0}{84{,}0} = 6{,}0 \times 10^{-2}$ mol.

$6{,}0 \times 10^{-2} - x_f = 0$ donc $x_f = 6{,}0 \times 10^{-2}$ mol.

− Si l'acide éthanoïque est le réactif limitant :

$n_i(CH_3CO_2H) - x_f = 0$.

$n_i(CH_3CO_2H) = 120 \times 3{,}7 \times 10^{-5} = 4{,}4 \times 10^{-3}$ mol

$4{,}4 \times 10^{-3} - x_f = 0$ donc $x_f = 4{,}4 \times 10^{-3}$ mol.

$x_f = 4{,}4 \times 10^{-3}$ mol ($4{,}4 \times 10^{-3}$ mol $< 6{,}0 \times 10^{-2}$ mol) : le réactif limitant est l'acide éthanoïque.

D'après le tableau d'avancement :

$n(CO_2\,(g)) = x_f = 4{,}4 \times 10^{-3}$ mol.

$V(CO_2\,(g)) = n(CO_2\,(g)) \times V_m$ soit :

$V(CO_2\,(g)) = 4{,}4 \times 10^{-3} \times 24{,}1 = 1{,}1 \times 10^{-1}$ L.

Le volume de dioxyde de carbone formé est $V(CO_2\,(g)) = 1{,}1 \times 10^{-1}$ L.

› Synthèse

Lorsque le réactif limitant disparaît, ici l'acide éthanoïque, la formation de bulles de gaz s'arrête et le mouvement d'aller-retour des gouttelettes cesse.

Si l'on rajoute des gouttelettes de vinaigre, le phénomène reprend.

− Si l'acide éthanoïque est encore le réactif limitant, le phénomène s'arrête dès sa disparition.

– Si l'hydrogénocarbonate de sodium est le réactif limitant, le phénomène s'arrête dès sa disparition. La lampe à lave est éphémère car le phénomène cesse dès la disparition du réactif limitant.

42 **1.** Les amines sont des bases selon la définition de Brønsted. Les couples acide-base mis en jeu sont :
$R—NH_3^+$ (aq) / $R—NH_2$ (aq) et H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ)
L'équation de la réaction est :
$R—NH_2$ (aq) + H_3O^+ (aq) → $R—NH_3^+$ (aq) + H_2O (ℓ)

2.

Équation de la réaction		**$R—NH_2$ (aq) + H_3O^+ (aq) → $R—NH_3^+$ (aq) + H_2O (ℓ)**			
État	**Avancement**	**Quantités de matière dans le système** (en mol)			
initial	$x = 0$	$n_i(R—NH_2\ (aq))$	$n_i(H_3O^+\ (aq))$	0	0
en cours	x	$n_i(R—NH_2\ (aq)) - x$	$n_i(H_3O^+\ (aq)) - x$	x	x
Final	x_f	$n_i(R—NH_2\ (aq)) - x_f$	$n_i(H_3O^+\ (aq)) - x_f$	x_f	x_f

$n_i(H_3O^+\ (aq)) = c_A \cdot V_A = 0{,}50 \times 20{,}0 \times 10^{-3}$
$= 1{,}00 \times 10^{-2}$ mol

À l'état final : $n_f(H_3O^+\ (aq)) = 0$ et $n_f(R—NH_2\ (aq)) = 0$.
Les réactifs ont disparu.
Donc $n_i(H_3O^+\ (aq)) - x_f = 0$, soit :
$n_i(H_3O^+\ (aq)) = 1{,}00 \times 10^{-2}$ mol

3. La formule générale des amines est $R—NH_2$, avec R un groupe alkyle de formule C_nH_{2n+1}
Donc la formule des amines peut s'écrire $C_nH_{2n+1}—NH_2$.
La masse molaire des amines s'écrit :
$M(R—NH_2) = n \cdot M(C) + (2n + 1) \cdot M(H) + M(N) + 2M(H)$
$M(R—NH_2) = n \times 12{,}0 + (2n + 1) \times 1{,}0 + 14{,}0 + 2 \times 1{,}0$
$= 12n + 2n + 1 + 14{,}0 + 2{,}0 = 14n + 17$

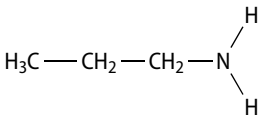
4. D'après le tableau d'avancement,
$n_f(R—NH_2\ (aq)) = 0$, donc $n_i(R—NH_2\ (aq)) - x_f = 0$
$n_i(R—NH_2\ (aq) - 1{,}00 \times 10^{-2} = 0$ donc :
$n_i(R—NH_2\ (aq)) = 1{,}00 \times 10^{-2}$ mol

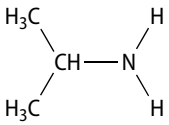
$$n_i(R—NH_2\ (aq)) = \frac{m(R—NH_2)}{M(R—NH_2)}$$

$$1{,}00 \times 10^{-2} = \frac{0{,}59}{14\ n + 17}$$

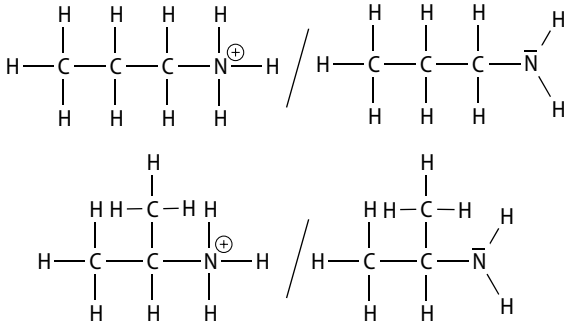
$14n + 17 = 59$, soit $14n = 42$, donc $n = 3$.
La formule brute de l'amine est : $C_3H_7NH_2$ ou C_3H_9N.

5.





6.



POUR PRÉPARER L'ECE ▮ *p. 38*

Protocole de préparation de la solution S_v correspondant à la solution obtenue à l'issue de l'extraction de la vanilline contenue dans 1 mL d'extrait de vanille et de l'ajout d'une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium :

• Placer environ 10 mL de solution saturée de chlorure de sodium dans un bécher.
• Y ajouter 1,0 mL d'extrait de vanille liquide à l'aide d'une verrerie adaptée.
• Agiter jusqu'à obtenir un mélange homogène.
• Transférer le mélange dans une ampoule à décanter.
• Y ajouter 20 mL d'éthanoate d'éthyle.
• Agiter modérément, laisser décanter.
• Éliminer la phase aqueuse.
• Verser, dans l'ampoule à décanter, 50 mL de solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 0,1 mol · L^{-1} afin de transformer la vanilline contenue en sa base conjuguée.
• Agiter modérément, laisser décanter.
• Récupérer la phase aqueuse.
• La transvaser dans une fiole jaugée de 250,0 mL.
• Rincer le bécher contenant la phase aqueuse avec un peu de la solution aqueuse d'hydroxyde de

sodium à 0,1 mol · L^{-1} et introduire ce volume dans la fiole jaugée de 250,0 mL.

• Compléter jusqu'au trait de jauge avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 0,1 mol · L^{-1} et agiter pour homogénéiser. La solution sera notée S_v.

1. Proposition et mise en œuvre de protocole expérimental

D'après le doc. 2, si le pH de la solution est inférieur à 7,4, c'est la vanilline (la forme acide) qui prédomine et si le pH de la solution est supérieur à 7,4, c'est l'ion vanillinate (la base conjuguée) qui prédomine. Pour justifier que la vanilline est sous forme d'ion vanillinate dans la solution, il est nécessaire de mesurer le pH de cette solution à l'aide du pH-mètre. On mesure le pH et on constate que pH = 12,4 > 7,4 : la vanilline est bien sous forme d'ion vanillinate.

2. Proposition et mise en œuvre de protocole expérimental

1. et **2.** D'après le doc. 2, il est possible de doser les ions vanillinate par spectrophotométrie.

On règle la longueur d'onde du spectrophotomètre sur $\lambda = 340$ nm.

On verse la solution S_d dans une cuve. On mesure l'absorbance A de la solution S_d : $A = 0{,}614$.

L'absorbance et la concentration en ions vanillinate sont liées par la relation :

$\grave{A} = 2{,}75 \times 10^4 \cdot c$, avec c la concentration en ions vanillinate en mol · L^{-1}.

On en déduit la concentration c_d en ions vanillinate :

$$c_d = \frac{A}{2{,}75 \times 10^4} = \frac{0{,}614}{2{,}75 \times 10^4} = 2{,}23 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

La solution S_v a été diluée 10 fois, donc $c_v = 10 \times c_d$:

$c_v = 10 \times 2{,}23 \times 10^{-5}$ mol · L^{-1} $= 2{,}23 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1}

3. Exploitation du résultat obtenu

1. $$\%m = \frac{100 \times 0{,}250 \times 152 \times 2{,}23 \times 10^{-4}}{1{,}10} = 0{,}771\ \%$$

2. Le pourcentage massique trouvé est supérieur à 0,2 %. Donc d'après le doc. 1, l'échantillon d'extrait de vanille respecte bien la teneur minimale en vanilline. Il peut porter l'indication « arôme de vanille ».

CHAPITRE 2

Manuel p. 40

Méthodes physiques d'analyse

LE PROGRAMME

1. Déterminer la composition d'un système par des méthodes physiques et chimiques

A) Analyser un système par des méthodes physiques

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
pH et relation pH = – log ([H_3O^+] / c°) avec c° = 1 mol · L^{-1}, concentration standard.	Déterminer, à partir de la valeur de la concentration en ion oxonium H_3O^+, la valeur du pH de la solution et inversement. *Mesurer le pH de solutions d'acide chlorhydrique (H_3O^+, Cl^-) obtenues par dilutions successives d'un facteur 10 pour tester la relation entre le pH et la concentration en ion oxonium H_3O^+ apporté.* **Capacité mathématique :** Utiliser la fonction logarithme décimal et sa réciproque.
Absorbance ; loi de Beer-Lambert Conductance, conductivité ; loi de Kohlrausch	Exploiter la loi de Beer-Lambert, la loi de Kohlrausch ou l'équation d'état du gaz parfait pour déterminer une concentration ou une quantité de matière. Citer les domaines de validité de ces relations. *Mesurer une conductance et tracer une courbe d'étalonnage pour déterminer une concentration.*
Spectroscopie infrarouge et UV-visible. Identification de groupes caractéristiques et d'espèces chimiques.	Exploiter, à partir de données tabulées, un spectre d'absorption infrarouge ou UV-visible pour identifier un groupe caractéristique ou une espèce chimique.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

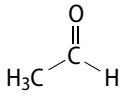
p. 40

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves connaissent les groupes caractéristiques et les fonctions chimiques, abordés en enseignement de spécialité de 1re.

› Exemple de réponse attendue

On retrouve dans cette molécule le groupe carbonyle caractéristique de la fonction aldéhyde. La formule semi-développée est :



› En classe de Terminale

L'analyse de spectres d'absorption infrarouge conduit à l'identification de groupes caractéristiques. L'**activité 3** permet de découvrir cette méthode d'analyse.

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves savent écrire l'équation de dissolution d'un solide ionique dans l'eau et relier concentration en soluté apporté et concentrations en quantité de matière effectives (programme de l'enseignement de spécialité de 1re).

› Exemple de réponse attendue

L'équation de dissolution du solide ionique est :

CaF_2 (s) → Ca^{2+} (aq) + 2 F^- (aq)

Les relations sont :

[Ca^{2+} (aq)] = c = 1 mol · L^{-1}

[F^- (aq)] = 2 × c = 2 mol · L^{-1}

› En classe de Terminale

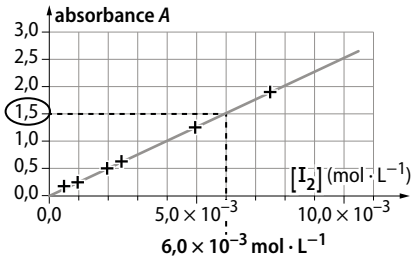
Les concentrations des espèces en solution sont déterminées par la réalisation de dosages par étalonnage spectrophotométriques et conductimétriques (**activité 2**).

SITUATION 3

Il s'agit ici de vérifier que les élèves savent exploiter une courbe d'étalonnage tracée à l'aide d'un spectrophotomètre pour déterminer une concentration en quantité de matière.

› Exemple de réponse attendue

Graphiquement, la concentration $[I_2]$ d'une solution d'absorbance $A = 1{,}5$ est :
$[I_2] = 6{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}



› En classe de Terminale

Les courbes d'étalonnage sont utilisées pour des dosages conductimétriques (**activité 2**).

ACTIVITÉS

p. 42 ACTIVITÉ 1

Calcul du pH d'une solution

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité amène les élèves à mesurer le pH de solutions d'acide chlorhydrique (H_3O^+, Cl^-) obtenues par dilutions successives d'un facteur 10 pour tester la relation entre le pH et la concentration en ions oxonium H_3O^+ apportés.
L'animation « Réalisation d'une dilution » décrit la réalisation d'une dilution à partir d'une solution mère. Ce protocole est répété afin de préparer la gamme étalon attendue.

› Démarche experte

On réalise une gamme de solutions obtenues par dilutions successives de la solution-mère d'acide chlorhydrique. Pour cela, on introduit, dans une fiole jaugée de 100 mL, 10 mL de la solution-mère prélevés grâce à une pipette jaugée. Le niveau de la fiole jaugée est alors complété avec de l'eau distillée de manière à ce que le bas du ménisque tangente le trait de jauge.

On mesure le pH de ces différentes solutions. On calcule l'opposé du logarithme de la concentration c de chacune des solutions et on représente graphiquement le pH en fonction de log c (voir *Démarche élémentaire*, question **3. a.**). On en déduit que la relation du doc. 2 est valable pour des concentrations comprises entre 10^{-6} et 10^{-2} mol · L^{-1}.

› Démarche avancée

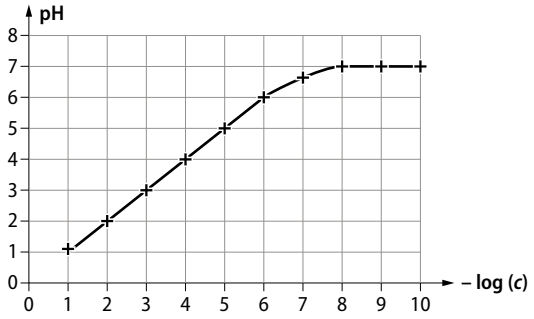
Voir *Démarche élémentaire.*

› Démarche élémentaire

1. c et **2.**

Concentration c (en mol · L^{-1})	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
pH	1,1	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	6,7	7
– log (c)	1	2	3	4	5	6	7	8

3. a.



b. La relation est valide pour des concentrations comprises entre 10^{-6} et 10^{-2} mol · L^{-1}. Au dessus de 10^{-2} mol · L^{-1}, le modèle n'est pas valide. En-dessous de $10^{-6{,}5}$ mol · L^{-1}, le solvant (l'eau) impose son pH.

p. 43 ACTIVITÉ 2

Dosage par conductimétrie

Commentaires pédagogiques

Cette activité met les élèves en situation de réaliser un dosage conductimétrique par étalonnage en s'appuyant sur une équation chimique de dissolution fournie.

› Exploitation et analyse

1. a et **b.**

On complète le tableau avec la relation :

$$c_i = \frac{c_m \cdot V(S_m)}{V(S_i)}.$$

Solution fille S_i	Volume (en mL)		Concentration c_i (en mol · L^{-1}) de S_i
	S_m	S_i	
S_1	10	50	$\frac{1{,}0\times10^{-2}\times10}{50}=2{,}0\times10^{-3}$
S_2	20	50	$\frac{1{,}0\times10^{-2}\times20}{50}=4{,}0\times10^{-3}$
S_3	30	50	$\frac{1{,}0\times10^{-2}\times30}{50}=6{,}0\times10^{-3}$
S_4	40	50	$\frac{1{,}0\times10^{-2}\times40}{50}=8{,}0\times10^{-3}$

Les concentrations étant inférieures à 10^{-2} mol · L^{-1}, la loi de Kohlrausch sera donc valide.

2. Il faut effectuer les mesures permettant de tracer le graphe $G = f(c)$, puis utiliser ce graphe pour trouver la concentration inconnue à partir de la mesure de sa conductance.
Pour $G = 0{,}74$ mS, on trouve :
$c_{diluée} = 5{,}3 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

3. Le prélèvement est beaucoup trop concentré pour effectuer directement une mesure de conductance (doc. 2).

› Conclusion

La solution d'eau de mer est 100 fois plus concentrée donc :
$c_{mer} = 100 \times 5{,}3 \times 10^{-3} = 5{,}3 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}
La concentration en masse est alors :
$c_m = c_{mer} \cdot M(NaCl)$
$= 5{,}3 \times 10^{-1} \times 58{,}5 = 31$ g · L^{-1}
Elle est légèrement supérieure à la moyenne, ce qui s'explique par la présence d'autres sels que le chlorure de sodium dans l'eau de mer.

p. 44 **ACTIVITÉ 3**

Spectroscopie infrarouge

Commentaires pédagogiques

Cette activité met les élèves en situation d'exploiter des spectres d'absorption infrarouge pour identifier la présence de groupes caractéristiques dans des molécules organiques.

› Résolution

On peut repérer, grâce à la table de données (doc. 3), les pics caractéristiques du spectre du composé majoritaire de la bouteille 1 :
– une bande large et moyenne à 3 100 cm^{-1}, caractéristique du groupe O—H des acides carboxyliques ;
– une bande fine et forte à 1 740 cm^{-1}, caractéristique du groupe C═O des acides carboxyliques.
Il s'agit donc, d'après l'équation du doc. 1, de l'acide éthanoïque.

On repère ensuite le(s) pic(s) caractéristique(s) du spectre du composé majoritaire de la bouteille 2 :
– une bande large et forte à 3 300 cm^{-1}, caractéristique du groupe O—H des alcools ;
– l'absence de bande caractéristique du groupe C═O ;
Il s'agit donc, d'après l'équation chimique du doc. 1, de l'éthanol.

› Conclusion

Le composé majoritaire de la bouteille 1 est l'acide éthanoïque. On en déduit que la bouteille 1 a tourné au vinaigre.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel *p. 50*

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, en réalisant le calcul à partir de la relation $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$, on trouve pH = 8,6 ≠ 2,5.
En effet, comme $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}, alors :
$pH = -\log([H_3O^+]) = -\log(2{,}5 \times 10^{-9}) = 8{,}6$.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car pH = 8,6 ≠ 12,2.
La proposition C est la bonne réponse.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, en réalisant le calcul à partir de la relation : $[H_3O^+] = c^\circ \times 10^{-pH}$, on trouve :
$[H_3O^+] = 6{,}3 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1} ≠ $1{,}2 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.
En effet, comme $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}, alors :
$[H_3O^+] = 10^{-pH} = 10^{-3{,}2} = 6{,}3 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1}.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse. En effet, on voit bien ci-dessus que :
$[H_3O^+] = 10^{-pH} = 10^{-3{,}2}$ mol · L^{-1}.

3 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la valeur de l'absorbance d'une solution dépend aussi de sa concentration et de la longueur d'onde à laquelle est effectuée la mesure.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la spectroscopie infrarouge ne donne pas d'information sur le nombre d'atomes dans la molécule.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la transmittance n'a aucun rapport avec la pureté de l'échantillon.
La proposition C est une bonne réponse.

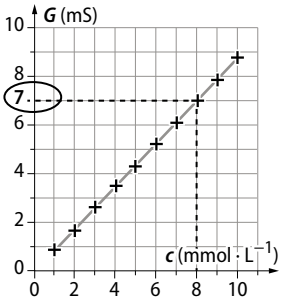
5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car c'est l'inverse de la longueur d'onde que l'on trouve en abscisse.

La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car c'est l'inverse de la longueur d'onde que l'on trouve en abscisse.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la longueur d'onde ne figure pas dans l'expression de la loi de Beer-Lambert.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car c'est le spectre d'absorption qui caractérise la nature d'une solution.
La proposition C est une bonne réponse.

7 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la loi de Kohlrausch établit une relation de proportionnalité entre conductance et concentration d'une solution.

8 La proposition A est une bonne réponse : la valeur 8 mmol · L^{-1} de la concentration est trouvée graphiquement.



La proposition B n'est donc pas une bonne réponse.
La proposition C n'est donc pas une bonne réponse.

Acquérir les bases p. 51

› 1. pH d'une solution

9 **1.** $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$

$= -\log\left(\frac{1{,}5\times10^{-3}}{1}\right) = 2{,}8$

2. $[H_3O^+] = \frac{1{,}5\times10^{-3}}{100} = 1{,}5\times10^{-5}$

$pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$

$= -\log\left(\frac{1{,}5\times10^{-5}}{1}\right) = 4{,}8$

3. La solution la plus acide est la moins diluée.

10 **1.** La concentration en quantité de matière d'ions oxonium de l'eau est : $[H_3O^+] = c^\circ \cdot 10^{-pH}$
On réalise le calcul en appliquant cette formule.
On sait que $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}, donc :
$[H_3O^+] = 10^{-pH} = 10^{-7{,}4} = 4{,}0\times10^{-8}$ mol · L^{-1}.

2. On peut rajouter de la solution d'acide chlorhydrique pour augmenter $[H_3O^+]$ et ainsi faire diminuer le pH.

11

pH	$[H_3O^+]$ (en mol · L^{-1})	Acide ou basique ?
12,3	$\mathbf{5{,}0\times10^{-13}}$	**basique**
7	$1{,}0\times10^{-7}$	**neutre**
8,5	$3{,}2\times10^{-9}$	**basique**
4,2	$\mathbf{6{,}3\times10^{-5}}$	**acide**

12 **1.** $6{,}3\times10^{-5}$ mol · $L^{-1} < [H_3O^+] < 3{,}2\times10^{-3}$ mol · L^{-1}
On réalise le calcul en appliquant la relation :
$pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$.
On sait que $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}, donc $pH = -\log([H_3O^+])$.
$pH_1 = -\log(6{,}3\times10^{-5})$ soit $pH_1 = 4{,}2$.
$pH_2 = -\log(3{,}2\times10^{-3})$ soit $pH_2 = 2{,}5$.

2. $2{,}5 < pH < 4{,}2$

3. Ces boissons sont acides car leur pH est inférieur à 7.

13 **1.** $[H_3O^+] = \frac{n}{V} = \frac{2{,}0\times10^{-4}}{200\times10^{-3}}$

$= 1{,}0\times10^{-3}$ mol · L^{-1}

2. $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right) = -\log\left(\frac{1{,}0\times10^{-3}}{1}\right) = 3$

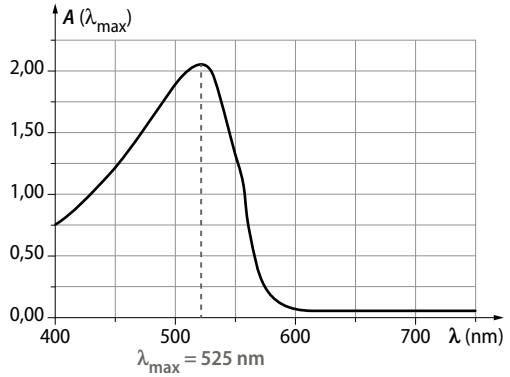
14 **1.** La relation est valable pour :
$1{,}0\times10^{-6{,}5}$ mol · $L^{-1} < [H_3O^+] < 1{,}0\times10^{-2}$ mol · L^{-1}

2. Pour les solutions trop diluées, l'eau impose un pH égal à 7.

3. On dilue d'un facteur $10^{5-2} = 1\,000$

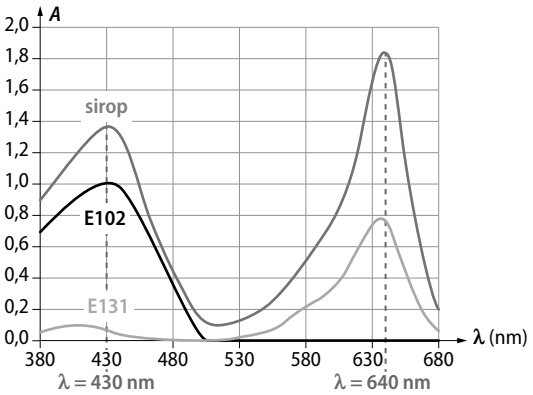
› 2. Identification par spectroscopie

15 **1.** On trouve graphiquement : $\lambda_{max} = 525$ nm.



2. Il s'agit du colorant rouge cochenille.

16 **1.** Toutes les valeurs des longueurs d'onde sont déterminées graphiquement.



Pour le colorant alimentaire E102, $\lambda_{max} = 430$ nm.
Pour le colorant alimentaire E131, $\lambda_{max} = 640$ nm.
Pour le sirop de menthe :
$\lambda_{max\,1} = 430$ nm et $\lambda_{max\,2} = 640$ nm.

2. On peut en déduire que la couleur verte du sirop de menthe est obtenue en mélangeant les colorants E102 et E131.

17 **1.** Cette bande est associée au groupe O—H d'un alcool.

2. $\lambda = \dfrac{1}{\tilde{\nu}} = \dfrac{1}{3\,500} = 2{,}86 \times 10^{-4}$ cm

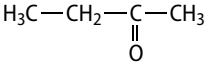
$= 2{,}86 \times 10^{-6}$ m $= 2\,860$ nm

Cela correspond au domaine infrarouge, donc la radiation n'est pas visible à l'œil nu.

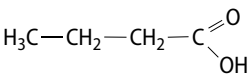
18 **1.** Il s'agit du nombre d'onde, qui s'exprime en cm^{-1}.

2. On note la présence à 1 750 cm^{-1} de la bande caractéristique du groupe C═O. La bande caractéristique du groupe C—H des aldéhydes est absente. Il s'agit donc d'une cétone.

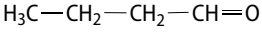
3. Il s'agit de la butanone, de formule semi-développée :



19 **1.** Formule semi-développée de l'acide butanoïque :



Formule semi-développée du butanal :



2. Spectre A :
La bande forte et fine située à $\tilde{\nu} = 1\,740$ cm^{-1} est caractéristique du groupe C═O des acides carboxyliques.
La bande forte et large située à $\tilde{\nu} = 3\,000$ cm^{-1} est caractéristique du groupe O—H des acides carboxyliques.

Spectre B :
La bande forte et fine située à $\tilde{\nu} = 1\,720$ cm^{-1} est caractéristique du groupe C═O des aldéhydes.
La bande faible et moyenne située à $\tilde{\nu} = 2\,830$ cm^{-1} est caractéristique du groupe C—H des aldéhydes.

3. Le spectre A est celui de l'acide butanoïque.
Le spectre B est celui du butanal.

› 3. Mesures physiques en solution

20 **1.** Pour réaliser une dilution, il faut prélever un volume V_m de solution-mère à l'aide d'une pipette jaugée, l'introduire dans une fiole jaugée de volume V_f et compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

2. La quantité de matière se conserve lors d'une dilution : la quantité de matière prélevée dans la solution-mère est la même que celle que l'on retrouve dans la solution-fille.

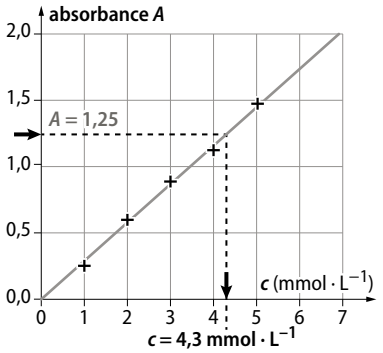
3. La concentration c_f de la solution-fille est calculée à partir de la relation :
$c_m \cdot V_m = c_f \cdot V_f$.

Volume V_m (en mL) **de solution-mère prélevé**	**Volume V_f** (en mL) **de solution-fille**	**Concentration c_f** (en mmol · L^{-1}) **de solution-fille**
10	50	$\dfrac{50 \times 10}{50} = 10$
20	50	$\dfrac{50 \times 20}{50} = 20$
30	50	$\dfrac{50 \times 30}{50} = 30$
40	50	$\dfrac{50 \times 40}{50} = 40$

4. On ne peut pas utiliser cette gamme étalon de solutions pour vérifier la loi de Beer-Lambert car cette loi n'est valable que pour des concentrations inférieures à 10^{-2} mol · L^{-1}.

21 **1.** La longueur d'onde a été choisie en se plaçant au maximum d'absorption de la solution.

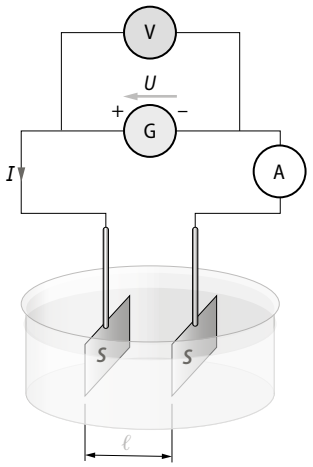
2.



3. La courbe tracée est une droite qui passe par l'origine. L'absorbance A et la concentration c sont proportionnelles. La loi de Beer-Lambert est vérifiée.

4. La concentration en quantité de matière de la solution est déterminée graphiquement :
$c_S = 4{,}3$ mmol · L^{-1} (voir graphique ci-dessus).

22 **1.**



Cellule de mesure

2. $\sigma = \dfrac{\ell}{S} \cdot G$

$= \dfrac{9 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-4}} \times 1{,}60 \times 10^{-3}$

$= 0{,}144$ S · m^{-1}

3. $\sigma = \lambda_{Na^+} \cdot c + \lambda_{HO^-} \cdot c$

Donc :

$c = \dfrac{\sigma}{\lambda_{Na^+} + \lambda_{HO^-}}$

$= \dfrac{0{,}144}{5{,}01 \times 10^{-3} + 19{,}9 \times 10^{-3}}$

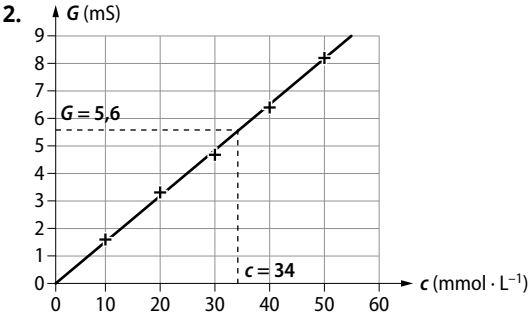
$= 5{,}78$ mol · m^{-3} $= 5{,}78 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}

23 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur : dans le tableau de mesures, l'intensité doit être en mA et non en A. Cette erreur a été corrigée dans le manuel de l'élève et les manuels numériques.*

1. $G = \dfrac{I}{U} = \dfrac{I}{5}$

Concentration c (mmol · L^{-1})	10	20	30	40	50
Intensité I (mA)	8	16,5	23,5	32	41
Conductance G (mS)	**1,6**	**3,3**	**4,7**	**6,4**	**8,2**

2.



3. On trouve une droite qui passe par l'origine. G et c sont proportionnelles. La loi de Kohlrausch est respectée.

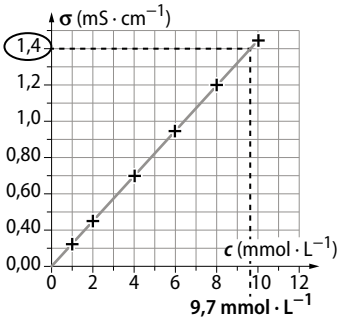
4. $G = \dfrac{I_S}{U} = \dfrac{28}{5} = 5{,}6$ mS

On trouve graphiquement $c_s = 34$ mmol · L^{-1} (voir figure ci-dessus).

24 **1.** La courbe tracée est une droite qui passe par l'origine. La conductivité σ et la concentration c sont proportionnelles. La loi de Kohlrausch est vérifiée.

2. La solution est diluée avant la mesure pour correspondre à la courbe étalon et parce que la loi de Kohlrausch n'est valide que pour des concentrations inférieures à 10^{-2} mol · L^{-1}.

3. La concentration en quantité de matière de soluté est déterminée graphiquement :
$c = 9{,}7$ mmol · L^{-1}.
La solution initiale est 1 000 fois plus concentrée, donc $c_s = 9{,}7$ mol · L^{-1}.



Faire le point avant d'aller plus loin p. 53

◗ ***Écrire la relation entre le pH et la concentration en quantité de matière d'ions oxonium, et expliciter chaque grandeur et son unité.***

concentration en ions oxonium (en **mol · L^{-1}**)

pH de la solution (sans unité) → $\mathbf{pH = -\log\left(\dfrac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)}$

concentration standard $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}

◗ ***Décrire le protocole expérimental permettant de réaliser une dilution d'un facteur 10 en nommant la verrerie utilisée.***

Dans une fiole jaugée de 100 mL, on introduit 10 mL de la solution-mère prélevée grâce à une pipette jaugée. Le niveau de la fiole jaugée est alors complété avec de l'eau distillée de manière à ce que le bas du ménisque tangente le trait de jauge.

◗ ***Décrire une méthode spectroscopique d'identification d'espèces chimiques en insistant sur les grandeurs importantes.***

La spectroscopie UV-visible par comparaison de spectres permet d'identifier des espèces chimiques en solution notamment en utilisant les valeurs des longueurs d'onde au maximum d'absorption.

◗ ***Expliciter les grandeurs et unités des axes d'un spectre infrarouge.***

La transmittance T (exprimée en %) est le quotient de l'intensité de la radiation transmise par l'intensité de la radiation incidente.

Le nombre d'onde $\tilde{\nu}$ est l'inverse de la longueur d'onde : $\tilde{\nu} = \dfrac{1}{\lambda}$.

Si λ est en cm, $\tilde{\nu}$ s'exprime en cm^{-1}.

◗ ***Décrire la méthode d'exploitation d'un spectre infrarouge.***

Des tables de données spectroscopiques permettent d'attribuer les bandes d'absorption à des groupes caractéristiques d'atomes.

◗ ***Énoncer la loi de Beer-Lambert et préciser pourquoi elle peut être utile pour déterminer une concentration.***

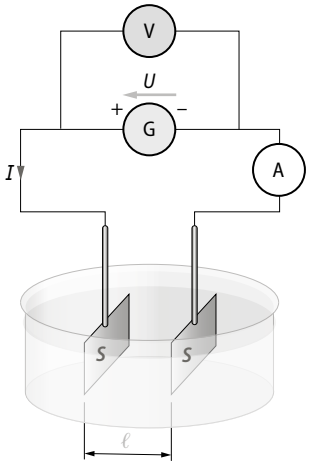
La loi de Beer-Lambert établit une proportionnalité entre l'absorbance A et la concentration en quantité de matière d'une solution c.

absorbance (sans unité) → $\mathbf{A = k \cdot c}$ ← concentration (en **mol · L^{-1}**)

coefficient de proportionnalité (en **L · mol^{-1}**)

Il est possible de s'appuyer sur une représentation graphique $A = f(c)$ pour réaliser un dosage par étalonnage.

◗ ***Décrire le montage expérimental permettant la mesure d'une conductance.***



Cellule de mesure

Les mesures de U et I permettent de calculer la conductance de la solution : $G = \dfrac{I}{U}$.

◗ ***Écrire la loi de Kohlrausch appliquée à l'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) de concentration c en quantité de matière de soluté apporté.***

$\sigma = \lambda_{H_3O^+} \cdot [H_3O^+] + \lambda_{Cl^-} \cdot [Cl^-]$

$\sigma = \lambda_{H_3O^+} \cdot c + \lambda_{Cl^-} \cdot c$

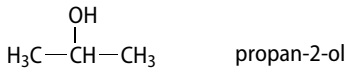
$\sigma = (\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot c$

Exercices similaires aux exercices résolus p. 54 et 55

26 **1.** L'ordonnée correspond à la transmittance en pourcentage. Cette grandeur traduit la capacité d'un échantillon à transmettre la lumière. On trouve en abscisse le nombre d'onde (exprimé en cm^{-1}), c'est l'inverse de la longueur d'onde.

2. On repère une bande large et forte située vers $\tilde{\nu}$ = 3 350 cm^{-1} qui permet d'identifier la liaison O—H d'un alcool.

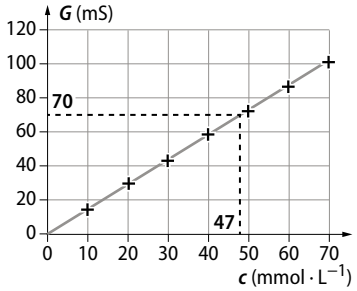
3. Il y a ici deux formules semi-développées possibles :



28 **1.** L'équation de dissolution permet de répondre à la question :

$MgSO_4$ (s) → Mg^{2+} (aq) + SO_4^{2-} (aq)

2. La courbe d'étalonnage permet par lecture graphique de déterminer la concentration molaire en soluté de la solution diluée : $c_S = 47$ mmol · L^{-1}.



3. On en déduit :
$[Mg^{2+}(aq)] = c_S = 47$ mmol · L^{-1}
$[SO_4^{2-}(aq)] = c_S = 47$ mmol · L^{-1}

S'entraîner pour maîtriser p. 56

29 **1.** Comme $\lambda_{H_3O^+} > \lambda_{Cl^-}$, l'intensité dans le circuit sera plus importante et le dégagement de H_2 plus efficace.

2. $\sigma = \lambda_{H_3O^+} \cdot [H_3O^+] + \lambda_{Cl^-} \cdot [Cl^-]$
$\sigma = (\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot c$
$\sigma = (35{,}0 \times 10^{-3} + 7{,}6 \times 10^{-3}) \times 10^{-2} \times 10^3$
$\sigma = 4{,}26 \times 10^{-1}$ S · m^{-1}

3. Pour multiplier l'intensité par 10, il est possible de multiplier la conductance par 10 en utilisant une solution 10 fois plus concentrée.

30 **1.** Le texte indique que l'ion hydrogène est responsable de l'acidité d'une solution.

2. Aujourd'hui, on l'appelle ion oxonium H_3O^+.

3. a. La relation mathématique conduisant au calcul du pH est :

concentration en ions oxonium (en **mol · L^{-1}**)

pH de la solution (sans unité) → $\mathbf{pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)}$ ← concentration standard $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}

b. pH = − log ([H_3O^+]) puisque $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}.
$c = 0{,}10$ mol · L^{-1}, alors pH = − log (0,10), soit pH = 1.

4. Ce calcul n'est pas valide car la solution est trop concentrée.
La relation est valide pour $[H_3O^+] < 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

31 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur à la question 1 : il faut lire « Describe the protocol for preparing 100 mL of solution no. 1 from solution no. 5. » Cette erreur a été rectifiée dans le manuel de l'élève et dans les manuels numériques.*

Suivi de la glycémie

Le diabète est une maladie qui affecte l'assimilation et le stockage du sucre dans le corps. Une personne saine à jeun a une glycémie (taux de glucose dans le sang) située entre 3,6 et 6,1 mmol · L^{-1}. Au laboratoire, une gamme de solutions de glucose est préparée et on en mesure l'absorbance.

Solution	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
Concentration en masse (g · L^{-1})	*0,20*	*0,40*	*0,60*	*0,80*	*1,0*
Absorbance	*0,090*	*0,17*	*0,25*	*0,34*	*0,42*

L'analyse d'un échantillon sanguin d'un patient donne une absorbance mesurée de A = 0,39.

1. *Décrire le protocole expérimental pour préparer 100 mL de la solution 1 à partir de la solution 5.*

2. *Déterminer la concentration en masse en glucose dans le sang de ce patient.*

3. *Que peut-on conclure de l'analyse sanguine ?*

1. Au cours d'une dilution, la masse de soluté se conserve : $m_5 = m_1$. Il faut prélever un volume V_5 de la solution-mère 5 cinq fois plus faible que le volume de solution-fille préparée.
Protocole :
• On prélève 20,0 mL de solution 5 à l'aide d'une pipette jaugée préalablement rincée avec un peu de solution.
• On verse le prélèvement dans une fiole jaugée de 100,0 mL.
• On remplit aux trois quarts avec de l'eau distillée, on bouche et on agite.
• On complète à l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
• On bouche et on agite.

2. Il faut tracer la courbe d'étalonnage ou utiliser la loi de Beer-Lambert.
Pour $A = 0{,}39$, on trouve $c_m = 0{,}92$ g · L^{-1}.

3. La concentration en quantité de matière est calculée à partir de la concentration en masse :
$c = \frac{c_m}{M} = \frac{0{,}92}{180} = 0{,}0051$ mol · L^{-1} = 5,1 mmol · L^{-1}
Cette concentration est dans l'intervalle donné, donc le patient à une glycémie normale et n'a pas de diabète.

32 **1. a.** H_3O^+ / H_2O et H_2O / HO^-.
b. $2\ H_2O \rightarrow H_3O^+ + HO^-$
c. Autant d'ions oxonium que d'ions hydroxyde sont formés, donc les concentrations sont égales.

2. On trouve $\overline{\sigma} = 5{,}5 \times 10^{-6}$ S · m^{-1} et un écart-type de $0{,}12 \times 10^{-6}$ S · m^{-1}.

3. $\sigma = \lambda_{H_3O^+} \cdot [H_3O^+] + \lambda_{HO^-} \cdot [HO^-]$

Donc :

$$[H_3O^+] = [HO^-] = \frac{\sigma}{\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{HO^-}}$$

$$= \frac{5{,}5 \times 10^{-6}}{35{,}0 \times 10^{-3} + 19{,}8 \times 10^{-3}}$$

$$= 1{,}00 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} = 1{,}00 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

4. $\text{pH} = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right) = -\log\left(\frac{1{,}00 \times 10^{-7}}{1}\right) = 7{,}00$

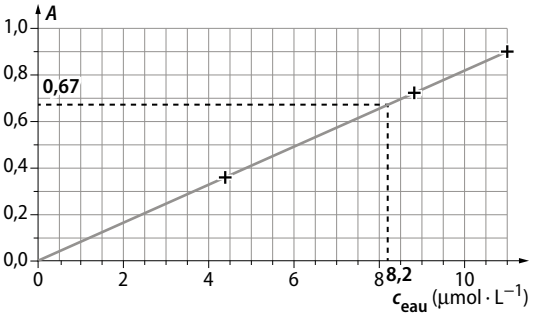
On retrouve le pH connu de l'eau pure.

33 **1. a.** et **b.** Pour la voie de synthèse ❶, le groupe caractéristique est le groupe hydroxyle qui appartient à la famille des alcools.
Pour la voie de synthèse ❷, le groupe caractéristique est le groupe hydroxyle qui appartient à la famille des acides carboxyliques.

2. Avec les tables de données, on constate, sur le spectre B, la disparition de la bande relative à la liaison C═O des aldéhydes, située vers $\tilde{\nu}$ = 1 680 cm^{-1}. De plus, la bande relative à la liaison O—H est présente dans les deux spectres, mais se décale vers les grands nombres d'onde, ce qui correspond plus à un alcool qu'à un acide carboxylique (la molécule de la voie ❷ garde un groupe hydroxyle tout de même). C'est donc la voie ❶ qui a été utilisée pour synthétiser cette molécule et conduire à la nouvelle fonction hydroxyle.
L'espèce chimique obtenue est donc la molécule ❶.

34 **› Démarche experte**

• On détermine d'abord graphiquement la concentration en quantité de matière en vert de malachite pour $A = 0{,}67$. On trouve : $c = 8{,}2 \times 10^{-6}$ mol · L^{-1}.

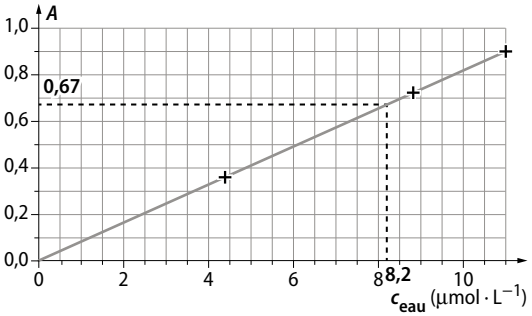


• On calcule ensuite :
− le volume V d'eau dans le bassin : $\boldsymbol{V = \ell \cdot L \cdot h}$
$V = 3{,}0 \times 8{,}0 \times 0{,}5 = 12 \text{ m}^3 = 12\,000$ L ;
− la quantité de matière n de vert de malachite dans le bassin : $\boldsymbol{n = c \cdot V}$
$n = 8{,}2 \times 10^{-6} \times 12\,000 = 9{,}8 \times 10^{-2}$ mol ;
− la masse m de vert de malachite dans le bassin : $\boldsymbol{m = n \cdot M}$
$m = 9{,}8 \times 10^{-2} \times 329 = 32$ g.
• Enfin, comme 1 g de charbon actif permet d'éliminer 10 mg de vert de malachite, la masse de charbon actif nécessaire à l'élimination du reste de vert de malachite est (sachant que 32 g = 32 000 mg) :

$$m_{\text{charbon}} = \frac{1 \times 32\,000}{10} = 3\,200 \text{ g soit } m_{\text{charbon}} = 3{,}2 \text{ kg.}$$

› Démarche avancée

1. Graphiquement, pour $A = 0{,}67$, on trouve :
$c = 8{,}2 \times 10^{-6}$ mol · L^{-1}.



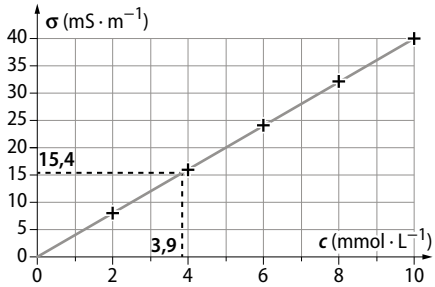
2. On calcule le volume V d'eau dans le bassin :
$\boldsymbol{V = \ell \cdot L \cdot h}$.
$V = 3{,}0 \times 8{,}0 \times 0{,}5 = 12 \text{ m}^3 = 12\,000$ L.
La quantité de matière n de vert de malachite dans le bassin est : $\boldsymbol{n = c \cdot V}$.
$n = 8{,}2 \times 10^{-6} \times 12\,000 = 9{,}8 \times 10^{-2}$ mol.
La masse m de vert de malachite dans le bassin est : $\boldsymbol{m = n \cdot M}$.
$m = 9{,}8 \times 10^{-2} \times 329 = 32$ g.

3. 1 g de charbon actif permet d'éliminer 10 mg de vert de malachite.
La masse de charbon actif nécessaire à l'élimination du reste de vert de malachite est (sachant que 32 g = 32 000 mg) :

$$m_{\text{charbon}} = \frac{1 \times 32\,000}{10} = 3\,200 \text{ g soit } m_{\text{charbon}} = 3{,}2 \text{ kg.}$$

35 **1.** La solution obtenue est ionique, donc elle est conductrice d'électricité.

2. Graphiquement, pour la solution S_1, on trouve : $c_1 = 3{,}9$ mmol · L^{-1}.
La solution S est 10 fois plus concentrée que S_1, donc $c = 3{,}9 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.



3. La loi de Kohlrausch n'est valide que pour des concentrations $c < 10^{-2}$ mol · L^{-1}, la solution S doit donc absolument être diluée ici.

4. • Calcul de la quantité de matière d'acide sulfamique dissoute dans S :
$n = c \cdot V = 3{,}9 \times 10^{-2} \times 0{,}200$ soit $n = 7{,}8 \times 10^{-3}$ mol.

• Calcul de la masse d'acide sulfamique dans 1 g de détartrant :
$m = n \cdot M = 7{,}8 \times 10^{-3} \times 97{,}0$ soit $m = 0{,}76$ g.

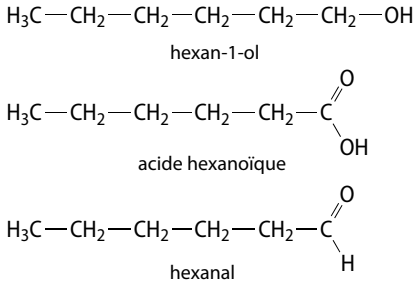
5. Calcul de la proportion en masse d'acide sulfamique dans ce détartrant :
$\frac{0{,}76}{1} = 0{,}76$ soit 76 %.

36 **1.** On calcule la longueur d'onde correspondant à chaque borne de l'axe des abscisses.

$$\lambda = \frac{1}{\tilde{\nu}} = \frac{1}{400} = 25 \times 10^{-4} \text{ cm}$$
$$= 25 \times 10^{-6} \text{ m} = 25\,000 \text{ nm}$$
$$\lambda = \frac{1}{\tilde{\nu}} = \frac{1}{4\,000} = 25 \times 10^{-5} \text{ cm}$$
$$= 25 \times 10^{-7} \text{ m} = 2\,500 \text{ nm}$$

Les longueurs d'onde sont au-delà du domaine du visible et correspondent bien au domaine des infrarouges.

2.



3. Spectre A : on note une bande large et forte à 3 310 cm^{-1}, caractéristique de la liaison O—H des alcools. Il s'agit de l'hexan-1-ol (étiquette 2).
Spectre B : on note une bande moyenne à 2 800 cm^{-1}, caractéristique de la liaison C—H des aldéhydes et une bande forte et fine à 1 720 cm^{-1}, caractéristique de la liaison C═O des aldéhydes. Il s'agit de l'hexanal (étiquette 1).
Spectre C : on note une bande large moyenne à 2 950 cm^{-1}, caractéristique de la liaison O—H des acides carboxyliques et une bande forte et fine à 1 720 cm^{-1}, caractéristique de la liaison C═O des acides carboxyliques. Il s'agit de l'acide hexanoïque (étiquette 3).

37 **Exemple d'exposé oral**
Dans le montage à double faisceau, la source lumineuse passe par le **monochromateur** qui sélectionne une seule longueur d'onde. Le **faisceau incident** est partagé en deux faisceaux : l'un dirigé vers le « blanc », c'est-à-dire le compartiment contenant le solvant, l'autre dirigé vers le compartiment de l'échantillon. L'intensité de la **lumière transmise** est mesurée par deux capteurs. Après avoir effectué le blanc avec les deux cuves remplies de solvant (**étalonnage**), l'appareil mesure l'absorbance de l'échantillon tout en corrigeant d'éventuelles variations du blanc au cours de la mesure. Ces variations peuvent être dues par exemple aux fluctuations d'intensité des lampes.

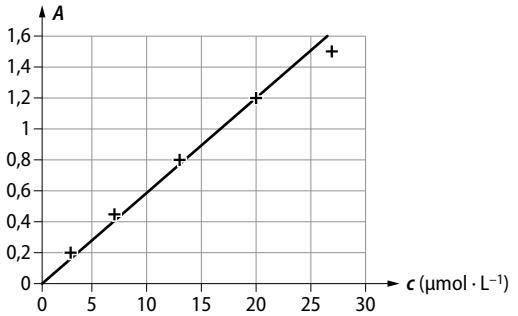
38 **Exemple d'exposé oral**
La mesure du pH permet de connaître la concentration en ions oxonium des solutions. Cette grandeur est primordiale pour la compréhension de nombreux processus biologiques et chimiques.
La spectroscopie UV-visible permet d'identifier certaines espèces absorbant dans le visible. Elle est aussi utile, comme la conductimétrie, pour des dosages par étalonnage.
Enfin, la spectroscopie IR est indispensable pour identifier les groupements d'atomes caractéristiques des molécules organiques.

Développer ses compétences p. 59

39 **› Questions préliminaires**
1. Lors de la fluorescence, une molécule absorbe un maximum de lumière, qu'elle restitue ensuite avec une longueur d'onde plus élevée. La courbe bleue correspond donc au spectre d'absorption de la fluorescéine.

2. Par lecture graphique du doc. 2, on voit que l'absorbance est maximale pour des concentrations en quantité de matière en ions oxonium inférieures à 10^{-8} mol · L^{-1}.

3. Si on trace le graphe $A = f(c)$, on obtient une droite qui passe par l'origine, l'absorbance est donc proportionnelle à la concentration en quantité de matière de fluorescéine : la loi de Beer-Lambert est respectée.



› Le problème à résoudre

Il faut se placer à la longueur d'onde du maximum d'absorption (courbe bleue du doc. 1) soit $\lambda_{max} = 490$ nm et à un pH supérieur à 8 (d'après la réponse à la question 2) pour que l'absorption soit maximale.

Sur la courbe tracée à la question 2, pour $A = 0{,}85$, on trouve $c_{diluée} = 15{,}1\ \mu mol \cdot L^{-1}$.

La solution injectable est 4 000 fois plus concentrée donc :

$$c_{injectable} = 4\,000 \times 15{,}1$$
$$= 60\,400\ \mu mol \cdot L^{-1}$$
$$= 60{,}4\ mmol \cdot L^{-1}$$

Soit une concentration en masse :

$$c_m = c_{injectable} \cdot M = 60{,}4 \times 330$$
$$= 19\,932\ mg \cdot L^{-1} = 19{,}9\ mg \cdot mL^{-1}$$

La solution semble optimale.

40 › Questions préliminaires

1. $Na_2CO_3\,(s) \rightarrow 2\ Na^+\,(aq) + CO_3^{2-}\,(aq)$

2. $[Na^+\,(aq)] = 2 \times c$ et $[CO_3^{2-}\,(aq)] = c$.

3. On trouve $\overline{\sigma} = 181\ mS \cdot m^{-1}$ et un écart-type de $11\ mS \cdot m^{-1}$.

› Le problème à résoudre

$$\sigma_{diluée} = \lambda_{Na^+} \cdot [Na^+] + \lambda_{CO_3^{2-}} \cdot [CO_3^{2-}]$$
$$= c_{diluée} \cdot (\lambda_{Na^+} \times 2 + \lambda_{CO_3^{2-}})$$

$$c_{diluée} = \frac{\sigma_{diluée}}{(\lambda_{Na^+} \times 2 + \lambda_{CO_3^{2-}})}$$
$$= \frac{181 \times 10^{-3}}{2 \times 5{,}0 \times 10^{-3} + 13{,}9 \times 10^{-3}}$$
$$= 7{,}6\ mol \cdot m^{-3} = 7{,}6 \times 10^{-3}\ mol \cdot L^{-1}$$

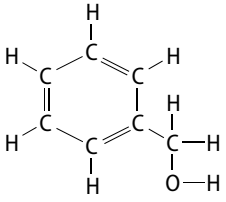
La concentration du produit d'entretien est 10 fois supérieure, donc $c = 7{,}6 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$.

La concentration en masse vaut alors :

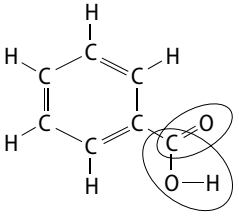
$c_m = c \cdot M = 7{,}6 \times 10^{-2} \times 286 = 21{,}7\ g \cdot L^{-1}$

D'après le doc. 1, la préparation peut être utilisée pour le nettoyage des murs et du sol.

41 Il faut tout d'abord repérer qu'une réaction acide-base a permis de passer de l'ion benzoate à l'acide benzoïque. On peut alors écrire les formules développées des molécules mises en jeu :



Alcool benzylique



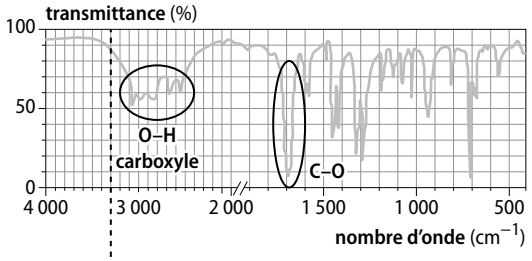
Alcool benzoïque

Le spectre IR du produit brut montre la présence d'une liaison C═O et d'une liaison O—H d'un groupe carboxyle, ce qui est conforme avec l'acide benzoïque, le produit désiré.

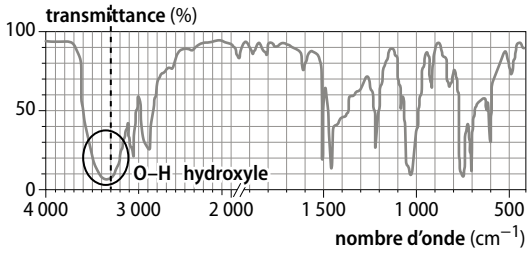
De plus, on constate la disparition de la bande relative à la présence d'une liaison O—H d'un groupe hydroxyle, donc on peut penser qu'il ne reste pas de traces de l'alcool benzylique.

Le produit obtenu est bien le produit désiré et la totalité du réactif utilisé a disparu, la synthèse semble donc être de bonne qualité.

Spectre du produit brut obtenu



Spectre de l'alcool benzylique



42 **1. a.** L'agitation thermique et donc la vitesse des ions augmentent avec la température. À champ électrique constant (même tension et même distance séparant les électrodes), la mobilité des ions augmente donc.

b. La conductivité molaire ionique augmente avec la mobilité des ions, donc avec la température.

2. La mobilité change de signe avec la charge de l'ion. Les ions se déplacent donc en sens opposés s'ils ont des charges opposées.

3. Oui, la conductivité et la conductivité molaire ionique augmentent avec la valeur de la charge d'un ion.

4. a. La conductivité molaire ionique dépend de la mobilité d'un ion, donc de sa taille et de la température. Elle dépend aussi de la charge de l'ion.

b. La conductivité molaire ionique d'un ion traduit donc sa capacité à transporter des charges d'une électrode à l'autre.

POUR PRÉPARER L'ECE *p. 62*

1. Proposition de protocole expérimental

On réalise le dosage spectrophotométrique par étalonnage de la solution contenue dans la seringue d'administration orale.
D'après les spectres fournis, le paracétamol absorbe dans les UV alors que le rouge azorubine absorbe dans le visible avec un maximum d'absorbance pour la longueur d'onde λ_{max} = 535 nm. Le spectrophotomètre doit donc être réglé sur cette dernière longueur d'onde afin de ne pas perturber les mesures par la présence de paracétamol.

Protocole :

• Réaliser une courbe d'étalonnage avec la gamme étalon fournie.

• Mesurer l'absorbance de la solution contenue dans la seringue.

• Utiliser la courbe pour déterminer la concentration en quantité de matière de la solution contenue dans la seringue en rouge azorubine.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental proposé

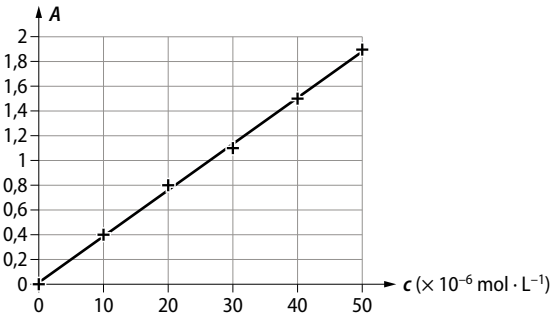
1. • Ouvrir le tableur-grapheur.

• Créer les grandeurs *A* et *c* correspondant respectivement à l'absorbance des solutions et à leur concentration en rouge azorubine

• Mesurer l'absorbance de chaque solution étalon :

c ($\times 10^{-6}$ mol · L^{-1})	A
0	0
10	0,4
20	0,8
30	1,1
40	1,5
50	1,9

• Tracer la courbe d'étalonnage :



• Mesurer l'absorbance de la solution contenue dans la seringue. On trouve $A = 0{,}70$.
• Utiliser la courbe d'étalonnage pour déterminer sa concentration en quantité de matière.
On trouve $c = 19{,}2 \times 10^{-6}$ mol · L^{-1}.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. Calculons la quantité de matière de rouge azorubine contenu dans la seringue :
$n = c \cdot V = 19{,}2 \times 10^{-6} \times 8{,}13 \times 10^{-3}$
$= 1{,}56 \times 10^{-7}$ mol.
La masse de rouge azorubine peut alors être calculée :
$m = n \cdot M = 1{,}56 \times 10^{-7} \times 502{,}2 = 7{,}84 \times 10^{-5}$ g
$= 0{,}0784$ mg
Le contenu de la seringue est prévu pour un enfant de 13 kg, la dose journalière admissible pour cet enfant est :
$m = 13 \times 4 = 52$ mg
La quantité de rouge azorubine ingérée lors de la prise du médicament ne représente aucun risque pour l'enfant.

2. Les principales sources d'erreurs et d'incertitudes sont :
– celles dues au spectrophotomètre ;
– celles possibles si des bulles d'air se trouvent sur le trajet de la lumière dans les cuves ;
– celles sur les concentrations en quantité de matière des solutions de la gamme étalon ;
– celle lors de la détermination graphique de *c* ;
– celles sur le volume exact contenu dans la pipette. Le volume de 8,13 mL est donné par le fabricant, mais il faut ajuster correctement à la graduation.

CHAPITRE 3

Manuel p. 64

Méthodes chimiques d'analyse

LE PROGRAMME

1. Déterminer la composition d'un système par des méthodes physiques et chimiques

C) Analyser un système par des méthodes chimiques

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Titre massique et densité d'une solution.	*Réaliser une solution de concentration donnée en soluté apporté à partir d'une solution de titre massique et de densité fournis.*
Titrage avec suivi pH-métrique. Titrage avec suivi conductimétrique.	Établir la composition du système après ajout d'un volume de solution titrante, la transformation étant considérée comme totale. Exploiter un titrage pour déterminer une quantité de matière, une concentration ou une masse. Dans le cas d'un titrage avec suivi conductimétrique, justifier qualitativement l'évolution de la pente de la courbe à l'aide de données sur les conductivités ioniques molaires. *Mettre en œuvre le suivi pH-métrique d'un titrage ayant pour support une réaction acide-base.* *Mettre en œuvre le suivi conductimétrique d'un titrage.* **Capacité numérique** : Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, l'évolution des quantités de matière des espèces en fonction du volume de solution titrante versé.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

▮ *p. 64*

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves connaissent la masse volumique de l'eau, rencontrée en 2de, et qu'ils savent l'exprimer dans des unités courantes.

› Exemple de réponse attendue

La masse volumique de l'eau a pour valeur $1{,}00 \times 10^3$ kg · m^{-3}, soit 1,00 g · cm^{-3}.
La valeur de la masse volumique de l'eau la plus couramment utilisée est $1{,}00 \times 10^3$ g · L^{-1}.
$\rho_{eau} = 1{,}00 \times 10^3$ g · L^{-1} $= 1{,}00 \times 10^3$ kg · m^{-3}
$= 1{,}00$ g · cm^{-3}

› En classe de Terminale

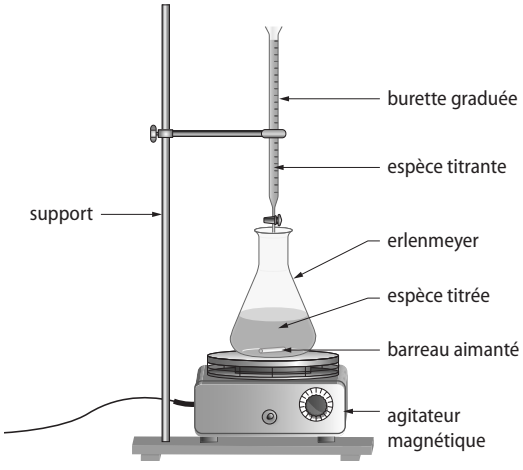
La notion de densité vient compléter celle de masse volumique. L'**activité 1** permet de réinvestir les formules relatives à ces grandeurs.

SITUATION 2

Les titrages par étalonnage et suivi colorimétrique ont été rencontrés en 2de et en 1re. Il s'agit ici de contrôler que les élèves en connaissent le dispositif expérimental.

› Exemple de réponse attendue

Schéma du dispositif expérimental à mettre en place pour un titrage :



› En classe de Terminale

Les élèves rencontreront ce montage à de nombreuses reprises dans ce chapitre et ils l'utiliseront en particulier dans les **activités 2 et 3**.

SITUATION 3

Il s'agit ici de revoir la notion de réactif limitant, connu depuis la classe de 2de.

› Exemple de réponse attendue

D'après l'équation de la réaction ($2\ Ag^+\ (aq) + Cu\ (s) \rightarrow 2\ Ag\ (s) + Cu^{2+}\ (aq)$), comme 1 mole de métal cuivre réagit avec 2 moles d'ions argent, si l'on fait réagir 1,0 mol d'ions cuivre avec 1,0 mol d'ions argent, les ions cuivre seront le réactif limitant.

› En classe de Terminale

C'est lors de l'étude de l'équivalence d'un titrage que la notion de réactif limitant sera utile.

ACTIVITÉS

p. 66 ACTIVITÉ 1

Dilution d'une solution

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité met les élèves en situation de réaliser une solution de concentration donnée en soluté apporté à partir d'une solution commerciale de titre massique et de densité fournis.

L'animation « Réalisation d'une dilution » décrit la réalisation d'une dilution à partir d'une solution-mère. Ce protocole est répété question 4 afin de préparer la solution-fille attendue.

› Exploitation et analyse

1. Il faut utiliser une pipette jaugée munie d'une propipette, une fiole jaugée et des béchers.

2. a. La masse d'un litre de solution commerciale est :

$$m_{solution} = \rho \cdot V = \rho_{eau} \cdot d \cdot V$$
$$= 1{,}00 \times 10^3 \times 1{,}17 \times 1 = 1{,}17\ kg$$

b. Elle contient une masse de soluté :

$$m_{soluté} = m_{solution} \cdot w = 1{,}17 \times 0{,}34 = 0{,}40\ kg$$

c. Sa concentration en quantité de matière de soluté est :

$$c = \frac{n_{soluté}}{V} = \frac{m_{soluté}}{M \cdot V} = \frac{0{,}40 \times 10^3}{36{,}5 \times 1} = 11\ mol \cdot L^{-1}$$

3. En regard des pictogrammes figurant sur l'étiquette du flacon, il faut porter des lunettes et des gants, et se placer sous la hotte aspirante.

› Expérience et synthèse

4. Pour préparer par dilution un volume $V_{diluée}$ = 500 mL (par exemple) d'une solution de concentration $c_{diluée} = 2 \times 10^{-1}\ mol \cdot L^{-1}$, on doit en prélever un volume :

$$V = \frac{c_{diluée} \cdot V_{diluée}}{c} = \frac{2 \times 10^{-1} \times 500 \times 10^{-3}}{11}$$
$$= 9 \times 10^{-3}\ L = 9\ mL.$$

Comme il n'existe pas de pipette jaugée de cette contenance, on utilisera une burette graduée pour prélever la solution commerciale.

p. 67 ACTIVITÉ 2

Titrage suivi par pH-métrie

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Dans cette activité, les élèves doivent mettre en œuvre le suivi pH-métrique d'un titrage ayant pour support une réaction acide-base, puis ils l'exploitent pour déterminer la concentration en acide lactique dans un détartrant. Cette activité mobilise aussi une capacité numérique, puisqu'ils doivent faire appel à un programme Python pour visualiser l'évolution des quantités de matière des espèces en fonction du volume de solution titrante versé.

› Expérience et exploitation

1. Les couples mis en jeu sont AH (aq) / A^- (aq) et H_2O (ℓ) / HO^- (aq).

L'équation support du titrage est :

$$AH\ (aq) + HO^-\ (aq) \rightarrow A^-\ (aq) + H_2O\ (\ell).$$

2. Sans dilution, le volume de solution d'hydroxyde de sodium qu'il faudrait verser pour atteindre l'équivalence serait supérieur au volume de la burette graduée de 25,0 mL.

On souhaite préparer par dilution un volume V_d de solution-fille dix fois moins concentrée ($c_d = c/10$) que la solution-mère de détartrant. Lors d'une dilution, la quantité de matière de soluté se conserve :

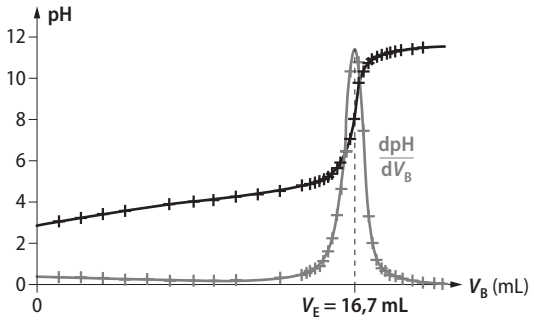
$$c \cdot V = c_d \cdot V_d\ ;\ c \cdot V = \frac{c}{10} \cdot V_d\ ;\ \text{d'où}\ V = \frac{V_d}{10}.$$

Le volume V à prélever doit être dix fois moins important que le volume final V_d de la solution-fille, donc on utilisera par exemple une pipette jaugée de 10,0 mL et une fiole jaugée de 100,0 mL.

3. • On met en œuvre le titrage.

• On détermine graphiquement le volume V_E de solution d'hydroxyde de sodium versé à l'équivalence, c'est le maximum de la courbe dérivée $\frac{dpH}{dV_B}$.

On trouve $V_E = 16{,}7$ mL.



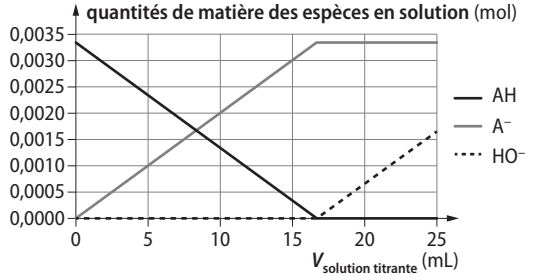
• On calcule la concentration c_d en acide lactique dans la solution diluée.
À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :
$n(AH)_{initiale} = n(HO^-)_{versée}$
$c_d \cdot V_A = c_B \cdot V_E$

$$c_d = \frac{c_B \cdot V_E}{V_A}$$

$$c_d = \frac{0{,}20 \times 16{,}7}{5} = 0{,}67 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

• On en déduit la valeur de la concentration c en acide lactique dans le détartrant.
La solution de détartrant est 10 fois plus concentrée que la solution titrée :
$c = 10\ c_d$, soit $c = 6{,}7$ mol · L^{-1}.

4. La représentation de l'évolution des quantités de matière des espèces en fonction du volume de solution titrante versé montre que :
– la quantité de matière de AH (l'espèce titrée) diminue jusqu'à l'équivalence, où elle s'annule ;
– la quantité de matière de l'espèce A^- augmente jusqu'à l'équivalence, puis elle reste constante ;
– la quantité de matière d'ions HO^- augmente à partir de l'équivalence.



› Synthèse

5. La masse d'acide lactique présente dans 1,00 L de détartrant est :
$m_{acide} = n \cdot M = c \cdot V \cdot M$
$m_{acide} = 6{,}7 \times 1{,}00 \times 90{,}0 = 603 \text{ g} = 6{,}0 \times 10^2 \text{ g}$
La masse de 1,00 L de détartrant est :
$m_{détartrant} = \rho \cdot V = 1{,}1 \times 1{,}00 = 1{,}1 \text{ kg}$.

Le pourcentage massique d'acide lactique présent dans le détartrant est :

$$\frac{m_{acide}}{m_{détartrant}} \times 100 = \frac{6{,}0 \times 10^2 \times 100}{1{,}1 \times 10^3} = 55\ \%$$

Ce résultat est cohérent avec l'indication de l'étiquette.

p. 68 **ACTIVITÉ 3**

Titrage par conductimétrie

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Dans cette activité, les élèves sont invités à mettre en œuvre le suivi conductimétrique d'un titrage en élaborant la démarche qui leur permettra de déterminer la teneur en hydroxyde de sodium dans un déboucheur liquide.

› Réponses aux coups de pouce

■ 1 : « C'est l'ion hydroxyde HO^- (aq). »

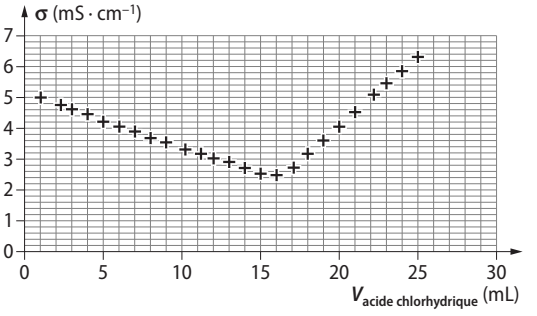
■ 2 : « Nous choisissons l'acide chlorhydrique comme solution titrante.
H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) → 2 H_2O (ℓ). »

■ 3 : « L'intersection des deux droites correspond au moment du titrage où il n'y a plus d'ions hydroxyde et pas encore d'ions oxonium en excès : c'est donc l'équivalence du titrage. »

■ 4 : « À l'équivalence, on a :
$n(HO^-$, à doser) = $n(H_3O^+$, versé à l'équivalence). »

› Exemple de résolution

On réalise le titrage conductimétrique de la solution de déboucheur préalablement diluée 10 fois par l'acide chlorhydrique de concentration en quantité de matière $c_A = 0{,}2$ mol · L^{-1}.
On obtient la courbe suivante :



On détermine graphiquement le volume V_E d'acide chlorhydrique versé à l'équivalence. Ce volume équivalent est égal à l'abscisse du point d'intersection des deux droites modélisant l'évolution de la conductivité. On trouve $V_E = 16$ mL.
À l'équivalence, on a : $n_A = n_B$, soit $c_d \cdot V_d = c_A \cdot V_E$.

D'où $c_d = \frac{c_A \cdot V_E}{V_d}$, donc il vient :

$c_d = \dfrac{0{,}20 \times 16}{10{,}0} = 0{,}32 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

et $c = 10\, c_d = 3{,}2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Calculons cette concentration en quantité de matière d'hydroxyde de sodium d'après l'indication du fabricant :

$$c_{fab} = \frac{n(\text{NaOH})_{\text{dans 1 L de déboucheur}}}{V_{\text{1 L de déboucheur}}}$$

$$= \frac{m(\text{NaOH})_{\text{dans 1 L de déboucheur}}}{M(\text{NaOH}) \cdot V_{\text{1 L de déboucheur}}}$$

$$= \frac{10\ \% \cdot m_{\text{1 L de déboucheur}}}{M(\text{NaOH}) \cdot V_{\text{1 L de déboucheur}}}$$

$$= \frac{10\ \% \times 1{,}23 \times 1{,}00 \times 10^3}{40{,}0 \times 1{,}0} = 3{,}1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Cette valeur est très proche de celle trouvée expérimentalement.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel p. 74

1 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car c'est le quotient de la masse de soluté par la masse de la solution.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car c'est le quotient de la masse de soluté par la masse de la solution.

2 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le titre massique n'a pas d'unité.
La proposition C est une bonne réponse.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la masse volumique s'exprime en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ par exemple.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la densité n'a pas d'unité.
La proposition C est une bonne réponse.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car elle doit être rapide.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car elle doit être totale.
La proposition C est une bonne réponse.

5 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car c'est le réactif titrant qui est limitant jusqu'à l'équivalence.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le milieu réactionnel peut être coloré (ou incolore) et le rester.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car les deux courbes tracées correspondent au titrage d'un acide par une base.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la courbe rouge pH = $f(V)$ correspond au titrage d'un acide par une base.

10 La proposition A n'est pas une bonne réponse car il s'agirait d'un suivi spectrophotométrique.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car il s'agirait d'un suivi pH-métrique.
La proposition C est une bonne réponse.

11 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la courbe de titrage présente une rupture de pente.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

12 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le volume équivalent est 11,2 mL, qui correspond à l'abscisse du point d'intersection des deux portions de droites.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le volume équivalent est 11,2 mL, qui correspond à l'abscisse du point d'intersection des deux portions de droites.
La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases p. 75

› 1. Caractériser les solutions

13 **1.** Cela signifie que, pour 1 000 g de solution aqueuse, il y a 950 g d'acide sulfurique.

2. La teneur en acide de la solution du laboratoire est plus importante.

3. $d = \dfrac{M \cdot c}{\rho_{eau} \cdot w} = \dfrac{98 \times 17{,}8}{1{,}00 \times 10^3 \times 0{,}95} = 1{,}8$

14 **1.** La solution est préparée à partir de 20 g d'ammoniac pour 100 g de solution obtenue.

2. $c = \dfrac{\rho_{eau} \cdot d \cdot w}{M} = \dfrac{1{,}00 \times 10^3 \times 0{,}95 \times 0{,}20}{17}$

$= 11 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

15 **1.** Les données de l'exercice sont la densité d, le titre massique w, la masse molaire M du soluté, et on sait que $\rho_{eau} = 1{,}00 \times 10^3$ g · L^{-1}. Donc on utilise la formule suivante (vue en cours, page 69) de la concentration en quantité de matière c :

$$c = \frac{\rho_{eau} \cdot d \cdot w}{M}$$

AN : $c = \frac{1{,}00 \times 10^3 \times 1{,}6 \times 0{,}75}{98}$ soit $c = 12$ mol · L^{-1}.

2. Pour réaliser une dilution, voici le matériel nécessaire : une fiole jaugée, une pipette jaugée et un pipeteur, un bécher.

3. Pour préparer par dilution un volume $V_{dilué} = 1{,}0$ L d'une solution de concentration $c_{dilué} = 0{,}1$ mol · L^{-1}, on doit en prélever un volume V (en L) de la solution commerciale, égal à :

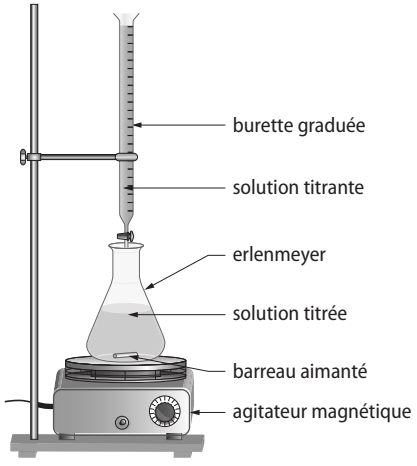
$$V = \frac{c_{dilué} \cdot V_{dilué}}{c}$$

AN : $V = \frac{0{,}1 \times 1{,}0}{12}$ soit $V = 8{,}3 \times 10^{-3}$ L $= 8{,}3$ mL.

Comme il n'existe pas de pipette jaugée de ce volume, on le prélève à l'aide d'une burette graduée. Il est ensuite transvasé dans une fiole jaugée de 1 L, puis il faut compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1,0 L.

› 2. Titrage

16 **1.**



2. La quantité de matière de l'espèce titrée A diminue jusqu'à l'équivalence, où elle s'annule.
La quantité de matière de l'espèce titrante B reste nulle jusqu'à l'équivalence, puis elle augmente.
À l'équivalence, les quantités de matière des espèces titrée A et titrante B sont toutes deux nulles.

3. L'équivalence du titrage correspond à l'état du système chimique pour lequel les espèces chimiques titrante et titrée ont été mélangées dans les proportions stœchiométriques.

17 **1.** L'équation de la réaction chimique support du titrage est :
$RCO_2H\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow RCO_2^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$

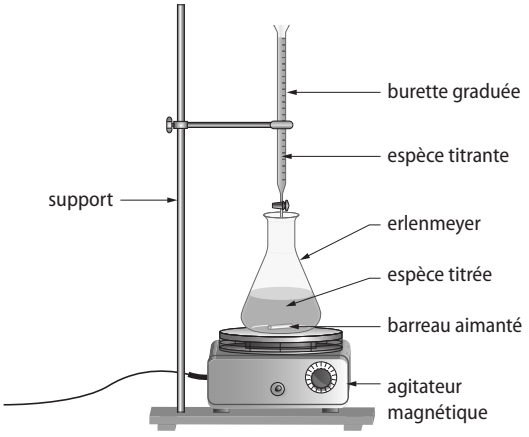
2. Pour être utilisée lors d'un titrage, une réaction chimique doit être rapide, totale et unique.

3. Avant l'équivalence, le réactif titrant est le réactif limitant, il est donc entièrement consommé tandis que le réactif titré est en excès.
À l'équivalence, les réactifs titrant et titré ont été introduits en proportions stœchiométriques, les deux sont donc entièrement consommés.
Après l'équivalence, le réactif titrant est en excès.

Avant l'équivalence	À l'équivalence	Après l'équivalence
$n(RCO_2H_{initial}) - x > 0$	$n(RCO_2H_{initial}) - x = 0$	$n(RCO_2H_{initial}) - x = 0$
$n(HO^-_{versé}) - x = 0$	$n(HO^-_{versé}) - x = 0$	$n(HO^-_{versé}) - x > 0$
$n(HO^-_{versé}) < n(RCO_2H_{initial})$	$n(HO^-_{versé}) = n(RCO_2H_{initial})$	$n(HO^-_{versé}) > n(RCO_2H_{initial})$

› 3. Titrage avec suivi pH-métrique

18 **1.**



2. Pour repérer l'équivalence, on cherche l'abscisse du minimum de la dérivée de la courbe pH = $f(V)$. Il correspond au volume équivalent V_E.

3. La solution titrée est une base. En effet, il s'agit ici du titrage d'une base par un acide car le pH diminue au cours des ajouts de solution titrante.

4. On aurait pu aussi utiliser la méthode des tangentes : on trace de part et d'autre de la zone de saut de pH deux tangentes à la courbe parallèles, puis une droite qui leur est parallèle et équidistante. Cette droite coupe la courbe de titrage au point d'abscisse V_E, le volume équivalent.

19 **1.** $AH\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow A^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$.

2. La méthode des tangentes permet de trouver $V_E \approx 14{,}4$ mL.

3. Soient $n(AH)_i$ la quantité de matière d'acide ascorbique à doser et $n(HO^-)_E$ la quantité de matière d'ions HO^- versée à l'équivalence.

$n(AH)_i = n(HO^-)_E$

$= c_B \cdot V_E$

$= 2{,}00 \times 10^{-2} \times 14{,}4 \times 10^3 = 2{,}88 \times 10^{-4}$ mol

4. Dans la fiole jaugée de 100,0 mL, il y avait une quantité de matière d'acide ascorbique AH égale à 10 $n(AH)_i$.

D'où $m = 10\ n(AH)_i \cdot M(C_6H_8O_6)$.

$m = 2{,}88 \times 10^3 \times 176 = 507$ mg ≈ 500 mg.

L'indication du fabricant « Vitamine C 500 » indique qu'un comprimé de vitamine C contient 500 mg d'acide ascorbique.

20 **1.** On peut suivre le titrage par pH-métrie et déterminer le volume équivalent par la méthode des tangentes ou la méthode de la dérivée sur le graphe $pH = f(V)$.

2. Lors du prélèvement de la prise d'essai à la pipette jaugée, le volume se mesure avec une certaine incertitude ; le volume équivalent déterminé graphiquement contient une incertitude également. Toutes ces sources d'incertitude font que tous les binômes ne trouvent pas exactement le même volume équivalent.

3. Le volume équivalent de 16,3 mL trouvé par le binôme 3 est aberrant puisque, en effet, toutes les autres valeurs sont proches de 12 mL. Il faut donc écarter cette valeur.

4. a. $\overline{V}_E = 12{,}0$ mL

b. $\sigma = 0{,}44$ mL et $u_{V_E} = \dfrac{\sigma}{\sqrt{N}} = \dfrac{0{,}44}{\sqrt{15}} = 0{,}11$ mL.

c. $V_E = 12{,}0$ mL avec une incertitude-type de 0,11 mL.

21 **1.** L'équation de la réaction chimique support du dosage est :

$AH\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow A^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$

2. L'équivalence est déterminée par la lecture du maximum sur la dérivée de la courbe $pH = f(V)$; elle est obtenue pour un volume de solution d'hydroxyde de sodium ajoutée $V_E = 4{,}0$ mL.

3. Soit $n(AH)$ la quantité de matière d'acide lactique AH de la solution S à doser et $n(HO^-)$ la quantité de matière d'ions HO^- versée à l'équivalence.

À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$n(AH)_{initiale} = n(HO^-)_{versée}$ donc $c_S \cdot V_S = c_1 \cdot V_E$,

soit $c_S = \dfrac{c_1 \cdot V_E}{V_S}$.

AN : $c_S = \dfrac{1{,}00 \times 10^{-3} \times 4{,}0}{50{,}00}$ soit $c_S = 8{,}0 \times 10^{-5}$ mol · L^{-1}.

4. Pour passer de la concentration c en acide lactique dans le sang du cheval à la concentration c_S, on a effectué une dilution.

Solution-mère : $V = 1{,}00$ mL

$c =$ **?** mol · L^{-1}

Solution-fille : $V_S = 50{,}00$ mL

$c_S = 8{,}0 \times 10^{-5}$ mol · L^{-1}

Au cours d'une dilution, la quantité de matière d'acide lactique ne change pas :

$c \cdot V = c_S \cdot V_S$ donc $c = \dfrac{c_S \cdot V_S}{V}$.

AN : $c = \dfrac{8{,}0 \times 10^{-5} \times 50{,}00}{1{,}00}$ soit $c = 4{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

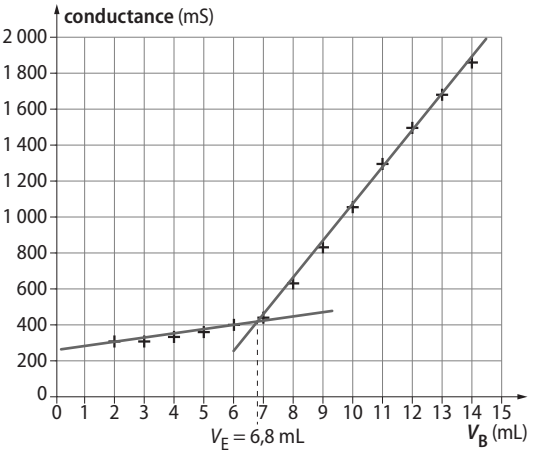
Comme $c > 3{,}5 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} (valeur du seuil de fatigue, donnée dans l'énoncé), le cheval n'est pas en forme.

› 4. Titrage avec suivi conductimétrique

22 **1.** $AH\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow A^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$

2. Avant l'équivalence, HO^- est le réactif limitant, il est totalement consommé au fur et à mesure de son ajout. Il apparaît des ions A^- qui font augmenter la conductance. Au-delà de l'équivalence, les ions HO^- ajoutés ne sont plus consommés. Ils sont responsables de l'augmentation de la conductance.

3. On trace deux segments de droite passant par le maximum de points. L'abscisse du point d'intersection de ces deux droites permet d'obtenir le volume équivalent : $V_E = 6{,}8$ mL.



4. **a**. À l'équivalence et d'après l'équation, on a $n(AH)_{initial} = n(HO^-)_{versée}$.

Donc $c_A \cdot V_A = c_B \cdot V_E$.

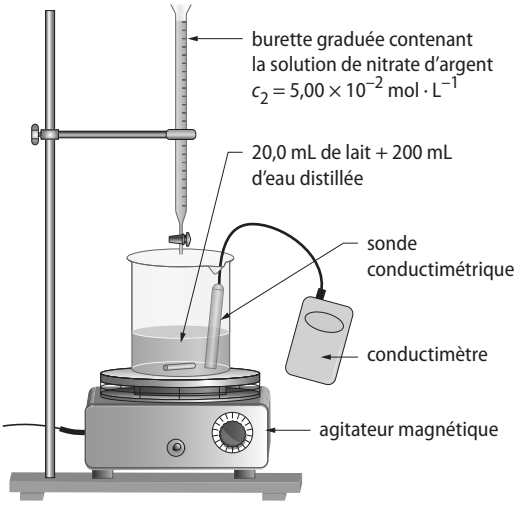
D'où $c_A = \dfrac{c_B \cdot V_E}{V_A} = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-1} \times 6{,}8}{100}$

$= 6{,}8 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

b. La masse d'acide acétylsalicylique est :
$m_A = c_A \cdot V \cdot M(AH)$
$m_A = 6{,}8 \times 10^{-3} \times 0{,}250 \times 180$
$m_A = 0{,}31$ g

Ce résultat est compatible avec la masse $m = 0{,}32$ g dissoute pour préparer la solution.

23 **1.** Schéma du montage expérimental :



2. Le changement de pente correspond à l'équivalence, c'est-à-dire au changement de réactif limitant. Avant l'équivalence, à chaque fois qu'un ion Cl^- réagit avec un ion Ag^+, un ion spectateur NO_3^- tombe dans le bécher. C'est comme si un ion NO_3^- remplaçait un ion Cl^-.
Comme les ions Cl^- ont une meilleure conductivité molaire ionique ($\lambda_{Cl^-(aq)} > \lambda_{NO_3^-(aq)}$), la conductivité σ du milieu diminue. On obtient ici une droite de pente négative.
Après équivalence, il n'y a plus d'ions Cl^-. La concentration en ions Ag^+ et NO_3^- augmente, donc la conductivité augmente. On obtient une droite de pente positive.
Conclusion : c'est la représentation graphique **C** qui convient pour ce titrage.

3. Le volume équivalent correspond à l'intersection des deux portions de droite de la courbe :
$V_E = 11{,}6$ mL.

Faire le point avant d'aller plus loin p. 77

◗ ***Définir le titre massique d'une solution.***

Le titre massique *w* d'une solution est le quotient de la masse de soluté contenu dans un échantillon de solution par la masse de cet échantillon. Il s'exprime en pourcentage et sans unité.

◗ ***Donner la différence entre densité et masse volumique.***

La masse volumique ρ d'une solution est sa masse par unité de volume, exprimée en kg · m^{-3}.
La densité *d* d'une solution, sans unité, est le quotient de sa masse volumique ρ par celle de l'eau ρ_{eau}, les deux masses volumiques étant exprimées dans la même unité.

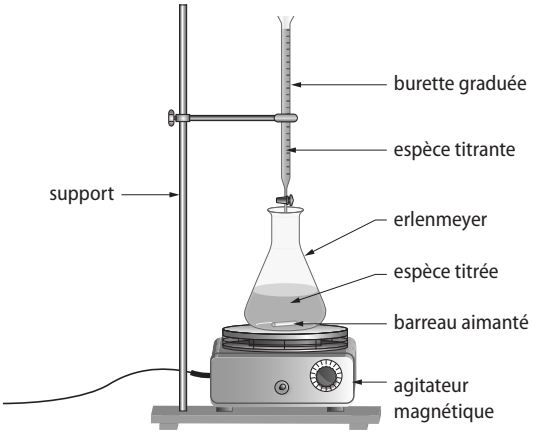
◗ ***Définir un titrage.***

Un titrage est une méthode de dosage qui consiste à déterminer la quantité de matière (ou la concentration ou la masse) d'une espèce chimique à l'aide d'une transformation chimique.

◗ ***Citer les propriétés d'une transformation chimique qui sert de support à un titrage.***

Pour qu'une transformation chimique puisse servir de support à un titrage, elle doit être totale, rapide et unique.

◗ ***Schématiser le dispositif expérimental d'un titrage.***



◗ ***Définir l'équivalence d'un titrage.***

L'équivalence du titrage correspond à l'état du système chimique pour lequel les espèces chimiques, titrante et titrée, ont été mélangées dans les proportions stœchiométriques ; elles sont donc totalement consommées.

◗ ***Expliquer les différentes méthodes de détermination de l'équivalence lors d'un titrage suivi par pH-métrie ou conductimétrie.***

– Lors d'un titrage suivi par pH-métrie, l'équivalence est repérée par la méthode des tangentes (on trace, de part et d'autre de la zone de saut de pH, deux tangentes à la courbe parallèles, puis une droite qui leur est parallèle et équidistante ; cette droite coupe la courbe de titrage au point d'abscisse V_E, le volume équivalent) ou par la méthode de la dérivée (à l'aide d'un logiciel, on trace la dérivée de la courbe pH = *f*(*V*) ; l'abscisse de l'extremum de cette courbe est le volume équivalent V_E ; l'extremum est

un maximum dans le cas du titrage d'un acide par une base ou un minimum lors du titrage d'une base par un acide).
– Lors d'un titrage suivi par conductimétrie, l'équivalence est repérée par le changement de pente de la courbe de titrage. Le volume équivalent V_E correspond à l'abscisse du point d'intersection des deux droites de la courbe de titrage.

Interpréter l'évolution des pentes d'une courbe de titrage conductimétrique.
Ce sont les conductivités molaires ioniques (exprimées en $S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$) et les concentrations des ions en solution qui expliquent l'évolution de la pente d'une courbe de titrage conductimétrique.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 78 et 79

25 **1.** La concentration en quantité de matière est $c_{com} = \dfrac{m_{soluté}}{M \cdot V}$.

À partir de l'expression du titre massique $w = \dfrac{m_{soluté}}{m_{solution}}$, on déduit que :

$m_{soluté} = m_{solution} \cdot w = \rho \cdot V \cdot w = \rho_{eau} \cdot d \cdot V \cdot w$

donc : $c_{com} = \dfrac{m_{soluté}}{m_{solution}} = \dfrac{\rho_{eau} \cdot d \cdot w}{M}$.

AN : $c_{com} = \dfrac{1{,}0 \times 10^3 \times 1{,}82 \times 0{,}92}{98}$

soit $c_{com} = 17 \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

2. L'équation de la réaction acide-base support du titrage est :

$H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) \rightarrow 2\ H_2O (\ell)$

3. À l'équivalence, on a : $n(H_3O^+) = n(HO^-)$,

soit $c \cdot V_A = c_B \cdot V_E$. D'où $c = \dfrac{c_B \cdot V_E}{V_A}$.

AN : $c = \dfrac{5{,}00 \times 10^{-2} \times 10{,}0}{20{,}0}$

soit $c = 2{,}5 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

4. $u_c = c \cdot \sqrt{\left(\dfrac{u_{V_E}}{V_E}\right)^2 + \left(\dfrac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\dfrac{u_{c_B}}{c_B}\right)^2}$

AN :
$u_c = 2{,}5 \times 10^{-2} \times \sqrt{\left(\dfrac{0{,}15}{10{,}0}\right)^2 + \left(\dfrac{0{,}10}{20{,}0}\right)^2 + \left(\dfrac{0{,}010}{5{,}00 \times 10^{-2}}\right)^2}$

soit $u_c = 0{,}005 \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

27 **1.** Le volume équivalent V_E est l'abscisse du point d'intersection des deux droites modélisant l'évolution de la conductivité σ avant et après l'équivalence : $V_E = 8{,}0$ mL.

2. À l'équivalence, les réactifs ont été mélangés dans les proportions stœchiométriques :
$n(Cl^-) = n(Ag^+) = c \cdot V_E$

AN : $n(Cl^-) = 2{,}00 \times 10^{-2} \times 8{,}0 \times 10^{-3}$ soit :
$n(Cl^-) = 1{,}6 \times 10^{-4}$ mol.

3. $m(NaCl)_{calculée} = n(NaCl) \cdot M(NaCl)$.
Or $n(NaCl) = n(Cl^-)$, donc :
$m(NaCl)_{calculée} = n(Cl^-) \cdot M(NaCl)$

AN : $m(NaCl)_{calculée} = 1{,}6 \times 10^{-4} \times 58{,}5$ soit :
$m(NaCl)_{calculée} = 9{,}4 \times 10^{-3}$ g.
Un échantillon de lotion de volume 10 mL a pour masse $m = 0{,}98 \times 10 = 9{,}8$ g.
Le fabricant annonce qu'il contient :
$m(NaCl)_{fabricant} = 0{,}1\ \% \times 9{,}8 = 9{,}8 \times 10^{-3}$ g, valeur voisine de la masse calculée :
$m(NaCl)_{calculée} = 9{,}4 \times 10^{-3}$ g.

S'entraîner pour maîtriser

p. 80

28 **1.** Le titre massique d'une solution est le quotient de la masse d'acide nitrique contenu dans un litre de solution par la masse d'un litre de solution.

2. $n = \dfrac{1\,260}{63}$ mol donc $c = 20 \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

3. Il faut diluer d'un facteur 100, donc utiliser une pipette jaugée de 1 mL pour une fiole jaugée de 100 mL.

29 ***À partir d'un graphique***
On titre deux solutions aqueuses de chlorure d'hydrogène par de la soude (solution aqueuse d'hydroxyde de sodium), l'une par pH-métrie et l'autre par conductimétrie. Les graphiques obtenus lors des titrages sont les suivants (voir manuel).
L'équation de la réaction support de titrage est :
$H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) \rightarrow 2\ H_2O (\ell)$.

1. *Préciser les grandeurs représentées sur les axes des graphiques, ainsi que leurs unités.*

2. *Déterminer le volume équivalent dans les deux cas.*

3. *Expliquer l'allure du graphe obtenu lors du titrage par conductimétrie.*

Données : *conductivités molaires ioniques à 25 °C :*
$\lambda(H_3O^+ (aq)) = 34{,}98 \text{ mS} \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$;
$\lambda(Na^+ (aq)) = 5{,}011 \text{ mS} \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$.

1. Le graphe du haut représente la conductivité en $mS \cdot cm^{-1}$ en fonction du volume de solution titrante versée, en mL, lors du titrage conductimétrique. Celui du bas représente le pH (sans unité) en fonction du volume de solution titrante versée, en mL, lors du titrage pH-métrique.

2. Pour le graphe du haut, il faut tracer deux segments de droite passant par le maximum de points et déterminer l'abscisse du point d'intersection de

ces deux droites. Le volume équivalent vaut 10,0 mL. Sur le graphe du bas, la méthode des tangentes permet de trouver un volume équivalent de 10,0 mL.

3. Avant l'équivalence, on verse des ions hydroxyde et sodium, mais les ions hydroxyde réagissent avec les ions oxonium présents. Ainsi, tout se passe comme si les ions oxonium présents dans le bécher étaient remplacés progressivement par des ions sodium, qui ont une conductivité moindre. Donc la conductivité diminue avant l'équivalence. Après l'équivalence, on continue de verser des ions hydroxyde et sodium, donc la conductivité de la solution augmente.

30 › Démarche experte

Pour déterminer la concentration apportée en acide, il faut repérer l'équivalence du titrage puis, à partir de sa définition, écrire une relation entre les quantités de matière des espèces titrante et titrée et en déduire la concentration en quantité de matière d'acide benzoïque dans la solution (voir *Démarche avancée*).

› Démarche avancée

1. Le volume équivalent V_E est l'abscisse du point d'intersection des deux droites modélisant l'évolution de la conductivité σ avant et après l'équivalence : $V_E = 10{,}0$ mL.

2. L'équation de la réaction support du titrage est :
$C_6H_5CO_2H\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow C_6H_5CO_2^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques, soit :
$n(C_6H_5CO_2H)_{initiale} = n(HO^-)_{versée}$

3. c est la concentration en quantité de matière d'acide benzoïque dans la solution S.

Il vient : $c \cdot V = c_B \cdot V_E$, soit $c = \dfrac{c_B \cdot V_E}{V}$.

AN : $c = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-1} \times 10{,}0}{100{,}0}$ soit $c = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

31 **1.** $H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$

2. L'équivalence lors d'un dosage conductimétrique correspond au point d'intersection des deux portions de droites, soit $V_E = 11{,}2$ mL.

3. a. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques, soit :
$n(H_3O^+)_{initiale} = n(HO^-)_{versée}$
$c_1 \cdot V_1 = c_B \cdot V_E$

b. $c_1 = \dfrac{c_B \cdot V_E}{V_1} = \dfrac{1{,}00 \times 10^{-1} \times 11{,}2}{100{,}0}$
$= 11{,}2 \times 10^3$ mol · L^{-1}.

4. La solution S_0 a été diluée 1 000 fois, donc :
$c_0 = 1\,000 \times c_1 = 11{,}2$ mol · L^{-1}.

5. $HCl\,(g) + H_2O\,(\ell) \rightarrow H_3O^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)$.
$m_0 = n_0 \cdot M(HCl) = c_0 \cdot V \cdot M(HCl)$
$m_0 = 11{,}2 \times 1 \times 36{,}5 = 409$ g

6. $m = \rho_0 \cdot V = 1\,160 \times 1{,}000 = 1\,160$ g.

7. a. Pour 1 160 g de solution, on a 409 g d'acide chlorhydrique, donc pour 100 g on aura :
$w = \dfrac{409 \times 100}{1\,160} = 35{,}3$ %.

b. Même si l'on trouve un pourcentage légèrement supérieur à celui donné par l'étiquette, celle-ci indiquant le pourcentage minimal en masse d'acide, l'indication est correcte.

8. En utilisant la méthode des tangentes, on trouve le volume à l'équivalence $V_E = 11{,}2$ mL.

32 **1.** L'équation de la réaction acide-base support du titrage est :
$AH\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow A^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$

2. a. La ligne du programme codant l'information correspondant à la concentration en quantité de matière de la solution titrée est la n° 7 car, à l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.
À l'équivalence, on a :

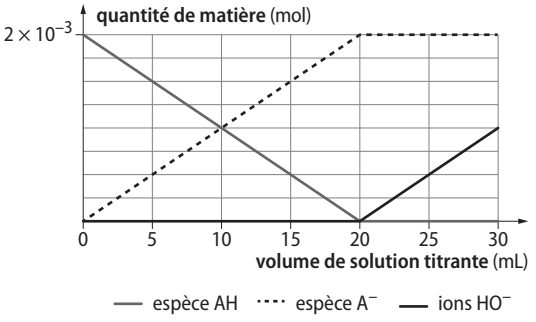
$c_A \cdot V_A = c_B \cdot V_E$, donc $c_A = \dfrac{c_B \cdot V_E}{V_A}$.

b. AN : $c_A = \dfrac{0{,}1 \times 20}{20}$ soit $c_A = 0{,}1$ mol · L^{-1}.

3. Voici les instructions cachées des lignes 20 et 23 :

```
20 plt.plot(V_B1,n_b1, color="green")
23 plt.plot(V_B2,n_b2, color="green")
```

4. Avant l'équivalence, les ions HO− (aq) sont le réactif limitant.
Après l'équivalence, on continue de verser de la soude et les ions HO^- (aq) se trouvent alors en excès, leur quantité de matière augmente.



33 **1.** La conductivité initiale est due aux ions présents dans la solution S, c'est-à-dire les ions chlorure et des cations qui, eux, ne réagiront pas lors du titrage.

2. • *Première partie : diminution de la conductivité du milieu réactionnel.*
On ajoute des ions Ag^+ et NO_3^- dans le milieu. Les cations argent réagissent avec les anions chlorure.

Ils forment un solide qui ne participe pas à la conductivité de la solution. La concentration en ions Cl^- diminue au fur et à mesure. La concentration en anions nitrate augmente au fur et à mesure. Tout se passe comme si les anions Cl^- étaient remplacés par des anions NO_3^-.
Comme $\lambda(NO_3^-\ (aq))$ est légèrement inférieure à $\lambda(Cl^-\ (aq))$, la conductivité diminue mais faiblement.

• *Deuxième partie : augmentation de la conductivité.*
Quand tous les ions chlorure sont consommés, les ions Ag^+ (aq) et NO_3^- (aq) ne réagissant plus, ils s'accumulent en solution. Leur concentration augmente, la conductivité va augmenter.

3. Le volume équivalent correspond à l'abscisse du point d'intersection des deux segments suivant l'évolution de la conductivité. On lit $V_E = 12{,}0$ mL.

4. À l'équivalence, tous les ions chlorure initialement présents ont été consommés par les ions argent, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques, soit :
$n(Ag^+\ (aq))_{versé} = n(Cl^-\ (aq))_{initial}$.

5. $c_2 \cdot V_E = n(Cl^-\ (aq))_{initial}$.

$c_2 \cdot V_E = c_1 \cdot V_1$, donc $c_1 = \dfrac{c_2 \cdot V_E}{V_1} = 6{,}00 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

6. a. $AH\ (aq) + HO^-\ (aq) \rightarrow A^-\ (aq) + H_2O\ (\ell)$
b. Cette réaction doit être rapide et totale.

7. a. La méthode des tangentes appliquée à la courbe $pH = f(V_B)$ permet de déterminer le volume équivalent $V_E = 12{,}0 \times 10^{-3}$ L.
b. À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques, on a versé autant d'ions HO^- qu'il y avait initialement de molécules de AH.
$n(AH) = n(HO^-)$
$n(AH) = c_B \cdot V_E$
$n(AH) = 5{,}00 \times 10^{-2} \times 12{,}0 \times 10^{-3} = 6{,}00 \times 10^{-4}$ mol d'acide lactique dans un volume $V_A = 20{,}0$ mL de lait.

8. Calculons la masse d'acide lactique dans un litre de lait :

$$m = \frac{n(AH) \cdot M(AH) \cdot V}{V_A}$$

$$m = \frac{6{,}00 \times 10^{-4} \times 90 \times 1\,000}{20{,}0} = 2{,}7 \text{ g}$$

2,7 g · L^{-1} > 1,8 g · L^{-1}, donc le lait n'est pas frais.

9.
$$\frac{u_m}{m} = \sqrt{\left(\frac{u_{V_E}}{V_E}\right)^2 + \left(\frac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_B}}{c_B}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0{,}16}{12{,}0}\right)^2 + \left(\frac{0{,}10}{20{,}0}\right)^2 + \left(\frac{0{,}010}{5{,}00 \times 10^{-2}}\right)^2}$$

$$= 0{,}2$$

Soit $u_m = 0{,}2 \times 2{,}7 = 0{,}54$ g, soit 0,6 g.

34 Exemple d'exposé oral
Pour réaliser le titrage d'un acide par une base avec un suivi pH-métrique, on réalise un montage permettant, tout au long du dosage, de mesurer le **pH** de la solution contenue dans le bécher en fonction du volume de soude versé. Ici, la **solution titrée**, l'acide chlorhydrique, se trouve dans un bécher contenant un **barreau aimanté** et placé sur un **agitateur magnétique**. La **solution titrante**, la soude, est versée progressivement par ajout de 5 mL. On assiste alors à la neutralisation de l'acide par la base. La courbe d'évolution du pH est une courbe croissante présentant une zone particulière, nommée « **saut de pH** », pour laquelle le pH s'élève brutalement. C'est l'**équivalence** du titrage.

35 Exemple d'exposé oral
Le titrage est une technique envisageable pour déterminer la concentration en masse ou en quantité de matière d'ions dans une eau. En fonction de la nature de l'ion, le suivi par pH-métrie ou celui par conductimétrie sera plus approprié.

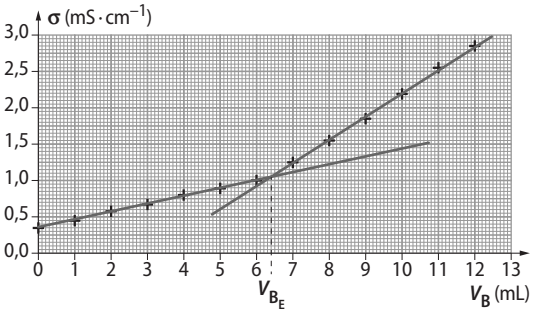
Développer ses compétences p. 83

36 › Questions préliminaires

1. Le gonflement des fromages est dû à la formation des gaz CO_2 (g) et H_2 (g) lors de la fermentation butyrique.

2. L'équation de la réaction support du titrage est la suivante :
$C_4H_8O_2\ (aq) + HO^-\ (aq) \rightarrow H_2O\ (\ell) + C_4H_7O_2^-\ (aq)$

3. a. L'équivalence d'un titrage correspond à l'état du système chimique pour lequel les espèces chimiques titrante et titrée ont été mélangées dans les proportions stœchiométriques.
b. Pour un titrage conductimétrique, l'équivalence est repérée en modélisant les deux portions de courbe par des demi-droites. Le volume équivalent est égal à l'abscisse du point d'intersection des deux demi-droites.
c.



On trouve : $V_{B_E} = 6{,}4$ mL.

› Le problème à résoudre

Pour savoir si le beurre est rance, il faut déterminer son pourcentage en masse en acide butanoïque.

À l'équivalence, le réactif titré $C_4H_8O_2$ et le réactif titrant HO^- ont été introduits dans les proportions stœchiométriques de l'équation de titrage :

$n(HO^-)_{versée} = c \cdot V_E$

$n(HO^-)_{versée} = 4{,}0 \times 10^{-1} \times 6{,}4 \times 10^{-3}$

$n(HO^-)_{versée} = 2{,}6 \times 10^{-3}$ mol

Ainsi, la masse d'acide lactique titrée est :

$m(C_4H_8O_2)_{titrée} = n(C_4H_8O_2) \cdot M(C_4H_8O_2)$

$m(C_4H_8O_2)_{titrée} = 2{,}6 \times 10^{-3} \times 88{,}0 = 0{,}23$ g dans 8,0 g de beurre.

Pour 100 g de beurre, on raisonne par proportionnalité :

$$x = \frac{0{,}23 \times 100}{8{,}0} = 2{,}9\ \%$$

Le pourcentage en masse en acide butanoïque est inférieur à 4 %, le beurre n'est donc pas rance.

37 › Questions préliminaires

1. a. Pour un adulte de 70 kg, l'apport de caféine ne peut dépasser $5 \times 70 = 350$ mg · jour^{-1}.

Les données indiquent que 350 mg de caféine correspondent environ à 10 canettes de soda.

b. $c = \frac{n}{V}$. Or $n = \frac{m}{M}$, donc $c = \frac{m}{M \cdot V}$.

$$c = \frac{350 \times 10^{-3}}{194 \times 10 \times 33 \times 10^{-2}} = 5{,}5 \times 10^{-4}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

2. $H_3PO_4\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow H_2PO_4^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$

› Le problème à résoudre

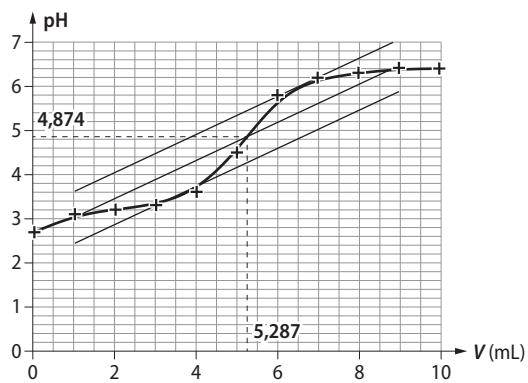
Déterminons la quantité d'acide phosphorique présente dans 10,0 mL de soda.

À l'équivalence, on a versé autant d'ions HO^- qu'il y avait d'acide H_3PO_4 dans les 10,0 mL de soda.

$n(H_3PO_4) = n(HO^-)$

$n(H_3PO_4) = c \cdot V_E$

Il faut déterminer la valeur du volume équivalent. Pour cela, on trace la courbe représentative du pH en fonction du volume d'hydroxyde de sodium versé, puis on met en œuvre la méthode des tangentes.



On lit $V_E = 5{,}3$ mL.

Soit $n(H_3PO_4) = 1{,}0 \times 10^{-2} \times 5{,}3 \times 10^{-3} = 5{,}3 \times 10^{-5}$ mol.

Soit une masse de :

$m = n \cdot M$

$m = 5{,}3 \times 10^{-5} \times (3 \times 1{,}0 + 31{,}0 + 4 \times 16{,}0) = 5{,}2$ mg

Dans 10 mL, il y a 5,2 mg d'acide phosphorique.

Par proportionnalité, dans 33 cL = 330 mL de soda, il y a donc une masse de $33 \times 5{,}2 = 0{,}17$ g d'acide phosphorique.

La DJA est de 70 mg · kg^{-1} · jour^{-1}, donc une personne de 70 kg pourra ingérer sans danger $70 \times 70 = 4{,}9 \times 10^3$ mg = 4,9 g d'acide phosphorique par jour.

Sachant qu'une canette contient 0,17 g d'acide phosphorique ; la personne pourra boire :

$\frac{4{,}9}{0{,}17} = 29$ canettes de 33 cL de soda.

Ce nombre est très supérieur à une consommation habituelle.

38 › Questions préliminaires

1. La densité du vinaigre est donnée par la formule $d = \frac{\rho_{vinaigre}}{\rho_{eau}}$.

On en déduit la masse volumique du vinaigre utilisé : $\rho_{vinaigre} = d \cdot \rho_{eau}$.

Comme $d = 1{,}0$, alors $\rho_{vinaigre} = \rho_{eau}$.

$\rho_{vinaigre} = 1{,}0$ g · mL^{-1}.

2. La solution-mère est du vinaigre pur :

c_0 mol · L^{-1} et V_0 à prélever.

La solution-fille est du vinaigre dilué 10 fois :

$c_1 = \frac{c_0}{10}$ mol · L^{-1} et V_1 préparé.

Au cours d'une dilution, la quantité de matière de soluté se conserve, donc :

$c_0 \cdot V_0 = c_1 \cdot V_1$

$c_0 \cdot V_0 = \frac{c_0}{10} \cdot V_1$

donc $V_0 = \frac{V_1}{10}$.

Protocole expérimental :

- On prélève à l'aide d'une pipette jaugée 10,0 mL de vinaigre pur.
- On verse ce volume dans une fiole jaugée de 100,0 mL.
- On ajoute de l'eau distillée jusqu'au tiers de la fiole. On agite.
- On ajoute de l'eau jusqu'au trait de jauge, puis on agite à nouveau.

On dispose d'une solution de vinaigre diluée 10 fois.

3. L'équation de la réaction support du titrage est : $CH_3CO_2H\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow CH_3CO_2^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$

› Synthèse

On cherche à déterminer la masse d'acide éthanoïque contenue dans 100 g de vinaigre pur.

• Calculons le volume V occupé par ces 100 g :

$\rho_{vinaigre} = \frac{m}{V}$ donc $V = \frac{m}{\rho_{vinaigre}}$.

AN : $V = \frac{100}{1,0}$ soit $V = 1,0 \times 10^2$ mL $= 1,0 \times 10^{-1}$ L.

• Cherchons la concentration en quantité de matière du vinaigre à l'aide du titrage.

À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques de l'équation support du titrage :

$CH_3CO_2H + HO^- \rightarrow CH_3CO_2^- + H_2O$

En notant n_{AH} la quantité de matière d'acide éthanoïque présente dans V_A = 10,0 mL de vinaigre dilué dix fois, on a : $n_{AH} = n_{HO^- versée}$.

$c_1 \cdot V_A = c_B \cdot V_E$, donc $c_1 = \frac{c_B \cdot V_E}{V_A}$.

• Calculons la masse m d'acide éthanoïque dans 100 g de vinaigre.

Le vinaigre ayant été dilué 10 fois, on a : $c_0 = 10\ c_1$

soit $c_0 = 10\ \frac{c_B \cdot V_E}{V_A}$.

$m = n \cdot M$

$m = c_0 \cdot V \cdot M$

$m = 10\ \frac{c_B \cdot V_E}{V_A} \cdot V \cdot M$

AN : $m = \frac{10 \times 0,100 \times 13,3}{10,0} \times 0,100 \times 60,0$

$= \frac{10 \times 0,100 \times 13,3 \times 0,100 \times 60,0}{10,0}$

soit m = 8,0 g. Donc le vinaigre utilisé est à 8,0 degrés, l'inscription sur l'étiquette est par conséquent validée.

39 **1.** Quantité de matière $n_i(HO^-)$ d'ions hydroxyde introduits dans le ballon lors de l'étape 1 :

$n_i(HO^-) = c_B \cdot V_B$

$n_i(HO^-) = 1,0 \times 10,0 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-2}$ mol

2. On cherche la quantité de matière n d'ions hydroxyde en excès présente dans le prélèvement de 10,0 mL.

D'après l'équation de la réaction support du titrage, à l'équivalence, $n = n(H_3O^+)_{versée}$.

$n = c_A \cdot V_{A_E}$

$n = 5,0 \times 10^{-2} \times 8,4 \times 10^{-3} = 4,2 \times 10^{-4}$ mol de HO^- en excès dans le prélèvement.

On cherche la quantité de matière n' d'ions hydroxyde en excès présente dans les 100,0 mL de départ :

$n' = 10,0\ n$

$n' = 4,2 \times 10^{-3}$ mol de HO^- en excès dans les 100,0 mL de départ.

3. $n_i(HO^-) - n(HO^-)_{consommée} = n'$

$n_i(HO^-) - n' = n(HO^-)_{consommée}$

$n(HO^-)_{consommée} = 1,0 \times 10^{-2}$ mol $- 4,2 \times 10^{-3}$

$= 10 \times 10^{-3} - 4,2 \times 10^{-3}$

$= 5,8 \times 10^{-3}$ mol

4. D'après l'équation (1), $\frac{n(HO^-)_{consommée}}{2} = n(AH)_i$.

$n(AH)_i = \frac{5,8 \times 10^{-3}}{2} = 2,9 \times 10^{-3}$ mol contenue dans le ballon initialement.

5. $n(AH)_i = \frac{m}{M(\text{acide acétylsalicylique})}$

D'où $m = n(AH)_i \cdot M$(acide acétylsalicylique).

$m = 2,9 \times 10^{-3} \times 180 = 522 \times 10^{-3}$ g = 522 mg.

Le résultat confirme l'indication « 500 mg » pour un comprimé.

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 86

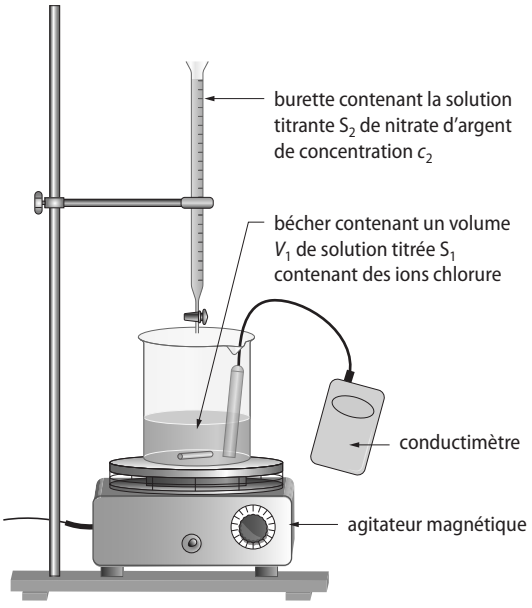
1. Proposition de protocole expérimental

On va réaliser le titrage conductimétrique des ions chlorure dans l'eau de l'échantillon.

Pour cela, prélever V_1 = 10,0 mL de la solution S_1 et les introduire dans un bécher.

Verser la solution aqueuse de nitrate d'argent dans la burette graduée.

Mettre en place le dispositif de dosage et introduire la sonde du conductimètre (qui est déjà étalonné) dans le bécher dans lequel on aura ajouté de l'eau pour bien immerger les électrodes.



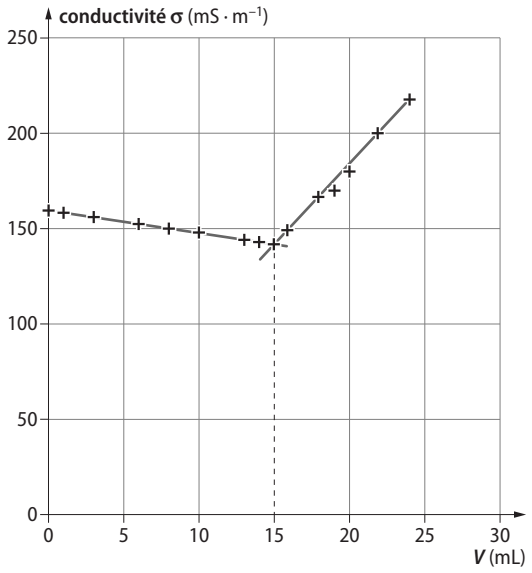
2. Mise en œuvre du protocole expérimental

Ouvrir le tableur-grapheur.

Créer les grandeurs V_B et σ correspondant respectivement au volume de solution aqueuse de nitrate d'argent versé et à la conductivité.
Verser la solution aqueuse de nitrate d'argent millilitre par millilitre jusqu'à 20,0 mL dans l'eau à analyser et mesurer les conductivités. Utiliser le tableur-grapheur pour afficher le graphe de σ en fonction de V_2.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. Voici le graphe obtenu :



Pour déterminer le volume versé à l'équivalence, on trace deux segments de droite passant par le maximum de points. Ils se coupent en un point dont l'abscisse indique le volume équivalent. On trouve $V_E = 15$ mL.
D'après l'équation chimique de la réaction support du titrage, on a $n(Ag^+)_{versée} = n(Cl^-)_{initiale}$.

Soit $c_2 \cdot V_E = c_1 \cdot V_1$, donc $c_1 = \dfrac{c_2 \cdot V_E}{V_1}$

$c_1 = \dfrac{1{,}00 \times 10^{-1} \times 15{,}0}{10{,}0} = 1{,}50 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}, concentration en ions Cl^- dans la solution S_1.
L'eau du marais est dix fois plus concentrée, sa concentration est donc $c = 10\ c_1$, soit :
$c = 1{,}50$ mol · L^{-1}

2. Déterminons la concentration en masse c_m d'ions chlorure de l'eau du marais.
$c_m = c_0 \times M_{Cl}$
$c_m = 1{,}50 \times 35{,}5 = 53{,}3$ g · L^{-1}
L'artémia peut se développer si $c_m > 30$ g · L^{-1}, ce marais est donc favorable à son développement.

3. Les principales sources d'incertitudes sont :
- erreurs lors du prélèvement du volume V_1 de la solution titrée (rinçage de la pipette, non-respect des traits de jauge) ;
- erreurs lors de la détermination des volumes V_2 versés pour construire la courbe (rinçage, remplissage, lecture des graduations de la burette) ;
- erreurs lors de la détermination graphique de V_E ;
- errreur sur la concentration de la solution titrante.

CHAPITRE 4

Manuel p. 88

Évolution temporelle d'un système chimique

LE PROGRAMME

2. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation

A) Suivre et modéliser l'évolution temporelle d'un système siège d'une transformation chimique

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Suivi temporel et modélisation macroscopique Transformations lentes et rapides. Facteurs cinétiques : température, concentration des réactifs. Catalyse, catalyseur.	Justifier le choix d'un capteur de suivi temporel de l'évolution d'un système. Identifier, à partir de données expérimentales, des facteurs cinétiques. Citer les propriétés d'un catalyseur et identifier un catalyseur à partir de données expérimentales. *Mettre en évidence des facteurs cinétiques et l'effet d'un catalyseur.*
Vitesse volumique de disparition d'un réactif et d'apparition d'un produit. Temps de demi-réaction.	À partir de données expérimentales, déterminer une vitesse volumique de disparition d'un réactif, une vitesse volumique d'apparition d'un produit ou un temps de demi-réaction. *Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration et déterminer la vitesse volumique de formation d'un produit ou de disparition d'un réactif.*
Loi de vitesse d'ordre 1.	Identifier, à partir de données expérimentales, si l'évolution d'une concentration suit ou non une loi de vitesse d'ordre 1. **Capacité numérique** : À l'aide d'un langage de programmation et à partir de données expérimentales, tracer l'évolution temporelle d'une concentration, d'une vitesse volumique d'apparition ou de disparition et tester une relation donnée entre la vitesse volumique de disparition et la concentration d'un réactif.
Modélisation microscopique Mécanisme réactionnel : acte élémentaire, intermédiaire réactionnel, formalisme de la flèche courbe. Modification du mécanisme par ajout d'un catalyseur. Interprétation microscopique de l'influence des facteurs cinétiques.	À partir d'un mécanisme réactionnel fourni, identifier un intermédiaire réactionnel, un catalyseur et établir l'équation de la réaction qu'il modélise au niveau microscopique. Représenter les flèches courbes d'un acte élémentaire, en justifiant leur sens. Interpréter l'influence des concentrations et de la température sur la vitesse d'un acte élémentaire, en termes de fréquence et d'efficacité des chocs entre entités.

Conformément au BO spécial n° 2 du 13 février 2020, les notions relatives à la partie « Modélisation microscopique » de ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite du baccalauréat à la date de publication du manuel.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 88

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves savent dresser le tableau d'avancement d'une réaction et exprimer les quantités de matières des différentes espèces en fonction de l'avancement de la transformation.

› Exemple de réponse attendue

Dressons un tableau d'avancement de la transformation étudiée :

Équation de la réaction :		α **A** + β **B** → γ **C** + δ **D**			
État	**Avancement**	**Quantités de matière dans le système**			
initial	$x = 0$	$n_0(A)$	$n_0(B)$	$n_0(C)$	$n_0(D)$
en cours	x	$n(A) = n_0(A) - \alpha \cdot x$	$n(B) = n_0(B) - \beta \cdot x$	$n(C) = n_0(C) - \gamma \cdot x$	$n(D) = n_0(D) - \delta \cdot x$
final	x_f	$n_f(A) = n_0(A) - \alpha \cdot x_f$	$n_f(B) = n_0(B) - \beta \cdot x_f$	$n_f(C) = n_0(C) - \gamma \cdot x_f$	$n_f(D) = n_0(D) - \delta \cdot x_f$

La transformation étant totale, on a : $x_f = x_{max}$.
B étant le réactif limitant, on a :

$n_f(B) = n_0(B) - \beta \cdot x_{max} = 0$. Donc $x_f = x_{max} = \dfrac{n_0(B)}{\beta}$.

La quantité de matière de chaque espèce chimique à l'état final est donc :

- $n_f(A) = n_0(A) - \alpha \cdot x_{max} = n_0(A) - \alpha \cdot \dfrac{n_0(B)}{\beta}$
- $n_f(B) = 0$
- $n_f(C) = n_0(C) + \gamma \cdot x_{max} = n_0(C) + \gamma \cdot \dfrac{n_0(B)}{\beta}$
- $n_f(D) = n_0(D) + \delta \cdot x_{max} = n_0(D) + \delta \cdot \dfrac{n_0(B)}{\beta}$

› En classe de Terminale

La quantité de matière d'une espèce intervenant dans une transformation lente est suivie par l'intermédiaire d'une grandeur mesurable (absorbance, pression, conductivité...). L'**activité 4** permet de mettre en application ces notions.

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves connaissent l'expression du taux de variation d'une fonction en un point, savent que ce taux de variation tend vers la dérivée de la fonction en ce point, et que la dérivée d'une fonction en un point est la pente de la tangente en ce point.

› Exemple de réponse attendue

Le taux de variation de C à l'instant t_2 s'exprime de la manière suivante :

$$\left(\frac{\Delta C}{\Delta t}\right)_{t_2} = \frac{C(t_3) - C(t_1)}{t_3 - t_1}$$

Lorsque t_1 et t_3 s'approchent de t_2, le taux de variation tend vers la dérivée de C en t_2, il représente alors le coefficient directeur de la tangente à la courbe $C(t)$ en t_2.

› En classe de Terminale

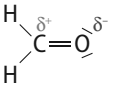
On définit la vitesse volumique d'apparition ou de disparition d'une espèce chimique à partir d'une dérivée mais, expérimentalement, on la détermine par un taux de variation. L'**activité 4** permet de mettre en pratique ces notions.

SITUATION 3

Il s'agit ici de vérifier que les élèves savent établir le schéma de Lewis d'une molécule et représenter les charges partielles sur une liaison covalente polarisée.

› Exemple de réponse attendue

La molécule de méthanal présente :
• des liaisons C—H apolaires car C et H ont des électronégativités proches.
• une liaison C═O polaire, avec O plus électronégatif que C. L'oxygène porte donc une charge partielle δ^- et C porte une charge partielle δ^+.
L'oxygène porte deux doublets non liants et établit deux liaisons simples.
On établit ainsi le schéma de Lewis du méthanal :



› En classe de Terminale

Le schéma de Lewis est réinvesti dans le modèle de la flèche courbe. L'**activité 2** développe cette notion.

ACTIVITÉS

p. 90 **ACTIVITÉ 1**

La catalyse

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité permet aux élèves de découvrir la notion de catalyse à travers des expériences simples.

La catalyse enzymatique proposée nécessite de la catalase, qui se conserve au congélateur. Celle-ci peut être remplacée par un morceau de navet ou de foie de bœuf haché.
L'animation « Catalyse enzymatique » décrit le principe de la catalyse enzymatique. Elle permet de répondre à la question 3.

› Expérience et exploitation

2. a. Le tube à essais n° 1 sert de tube témoin. On n'y observe rien car la réaction de dismutation de l'eau oxygénée est très lente.
b. La dismutation de l'eau oxygénée produit du dioxygène. Le dégagement gazeux observé pour les tubes 2, 3 et 4 est donc du dioxygène.
c. Le catalyseur est écrit au-dessus de la flèche de l'équation de réaction.
On a donc, pour le tube n° 2 :

$$2\,H_2O_2\,(aq) \xrightarrow{Fe^{2+}\,(aq)} 2\,H_2O\,(\ell) + O_2\,(g)$$

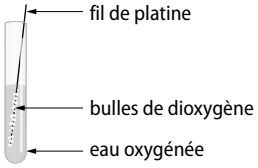
Pour le tube n° 3 :

$$2\,H_2O_2\,(aq) \xrightarrow{Pt\,(s)} 2\,H_2O\,(\ell) + O_2\,(g)$$

Pour le tube n° 4 :

$$H_2O_2\,(aq) \xrightarrow{\text{catalase}} 2\,H_2O\,(\ell) + O_2\,(g)$$

3. Une enzyme est une protéine présentant une forme particulière adaptée aux réactifs de la réaction qu'elle catalyse. Les réactifs s'approchent de l'enzyme et forment un complexe enzyme-substrat, siège de la réaction. Une fois la réaction terminée, les produits se séparent de l'enzyme, qui peut alors recevoir de nouveaux réactifs.
4. a.



Le dégagement gazeux s'observe à la surface du fil solide.
b. Dans l'industrie, on préfère utiliser des poudres ou des structures en nid d'abeilles pour que la surface de contact entre le catalyseur et les réactifs soit maximale, car c'est là que la réaction est catalysée.

› Synthèse

5. Un catalyseur est une substance servant à accélérer ou orienter une réaction chimique. Le tube à essais n° 1 est le siège d'une catalyse homogène car le catalyseur et les réactifs sont dans une même phase liquide. Le tube à essais n° 2 est le siège d'une catalyse hétérogène car le catalyseur est solide alors que les réactifs sont en phase liquide. Le tube à essais n° 3 est le siège d'une catalyse enzymatique car le catalyseur est de la catalase – soit ajoutée directement, soit se trouvant dans le navet ou le foie de bœuf – qui est une enzyme.

p. 91 **ACTIVITÉ 2**

Le formalisme de la flèche courbe

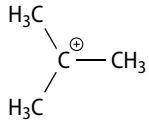
Commentaires pédagogiques

Cette activité permet à l'élève de découvrir le formalisme de la flèche courbe.
L'animation « Flèche courbe » explique la formation de liaisons par le formalisme de la flèche courbe. Elle aide à répondre aux questions portant sur le document 3.

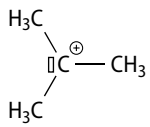
› Exploitation et analyse

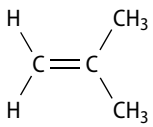
1. a.

Les trois doublets non liants autour de l'oxygène sont des sites donneurs de doublet d'électrons.



Le carbone portant une charge positive est un site accepteur de doublet d'électrons. Il comporte une lacune électronique :

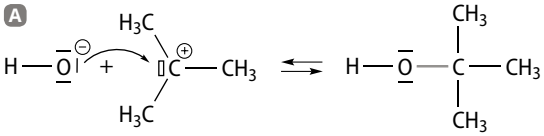




La double liaison entre les deux atomes de carbone est un site donneur de doublet d'électrons.

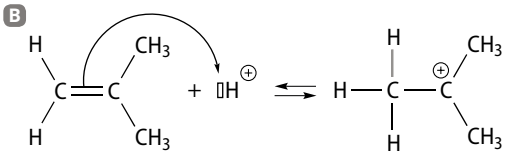
L'ion hydrogène est un site accepteur de doublet d'électrons. Il comporte une lacune électronique :

b. La flèche courbe part du site donneur et pointe vers le site accepteur de doublet d'électrons :



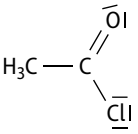
La nouvelle liaison formée est la liaison C—O.

B



La nouvelle liaison formée est une des liaisons C—H.

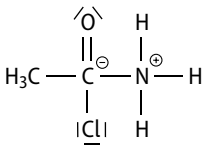
2. a. Le doublet non liant porté par l'azote de la molécule NH_3 est un site donneur de doublet d'électrons.



Dans la molécule ci-contre, l'oxygène et le chlore sont plus électronégatifs que le carbone. Donc l'oxygène ainsi que le chlore sont porteurs d'une charge partielle négative δ^- et le carbone porte une charge partielle positive $2\,\delta^+$. Le carbone est donc un site accepteur de doublet d'électrons.

La flèche courbe ❶ part donc du site donneur de doublet d'électrons de la molécule NH_3 et pointe vers le site accepteur de doublet d'électrons de l'autre molécule.

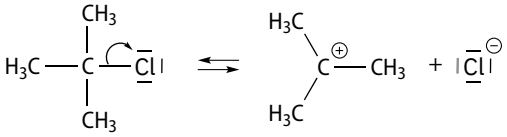
b. Le produit issu de la seule flèche ❶ serait :



La nouvelle liaison formée est la liaison C—N.

c. Dans cette entité, le carbone porte un doublet liant de trop par rapport à la structure stable du gaz noble. Cette entité est donc énergétiquement défavorable. Un des doublets de la double liaison C═O est donc simultanément déplacé sur l'oxygène. Ce déplacement d'électrons est représenté par la flèche ❷.

3. a.



b. Dans cette étape, il y a rupture de la liaison C—Cl. Le chlore étant plus électronégatif que le carbone, il est possible, dans certaines conditions, que le chlore attire complètement le doublet liant qu'il partage avec le carbone. Ainsi, la liaison covalente se rompt.

› Synthèse

4. La flèche courbe modélise les transferts d'électrons entre entités lors d'une réaction élémentaire. Lors de la formation d'une liaison, la flèche courbe part d'un site donneur de doublet d'électrons, c'est-à-dire de forte densité électronique, et pointe vers un site accepteur de doublet d'électrons, c'est-à-dire de faible densité électronique. Lorsque l'entité issue d'une seule flèche courbe est défavorable, on représente sur la même étape une deuxième flèche courbe conduisant vers une entité plus stable.

La flèche courbe peut également modéliser la rupture d'une liaison covalente.

p. 92 ACTIVITÉ 3

Facteurs cinétiques

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité permet à l'élève de découvrir la notion de facteur cinétique. Les facteurs cinétiques étudiés ici sont la concentration en quantité de matière des réactifs et la température, sur la base d'une même réaction lente : la formation d'un précipité de soufre à partir d'ions thiosulfate et d'acide chlorhydrique. Ce qui permet d'évaluer une durée caractéristique de cette transformation, c'est la durée au bout de laquelle le mélange devient opaque (le volume des mélanges réalisés doit être le même et les béchers utilisés pour toutes les mesures doivent être identiques). Cela peut être estimé en mettant un morceau de papier marqué d'une croix sous le bécher contenant le milieu réactionnel. Lorsque la croix n'est plus visible à l'œil, on estime que le milieu est opaque. L'estimation de cette durée n'est pas très précise ici, mais les concentrations et les températures proposées sont telles que cette précision suffit à établir l'influence des facteurs cinétiques étudiés.

› Démarche experte

◗ *Influence de la concentration des réactifs*

D'après le document 2, on dispose de solutions de thiosulfate de sodium et d'acide chlorhydrique à des concentrations différentes. Le mélange de ces solutions produit un précipité qui opacifie la solution. On peut donc déterminer la durée au bout de laquelle la solution devient opaque pour différentes valeurs de la concentration des réactifs. Pour cela, on peut placer une feuille de papier marquée d'une croix sous le bécher, ou dessiner une croix au marqueur sous le bécher, et voir, une fois le mélange réalisé, au bout de combien de temps celle-ci ne sera plus visible.

On peut préparer trois mélanges comme proposé ci-dessous. Les durées caractéristiques Δt de la transformation pour chacun des mélanges sont données dans le tableau ci-dessous.

Remarque : on peut réaliser ces trois mélanges simultanément en versant d'abord les 40 mL de thiosulfate de sodium dans les trois béchers, puis en préparant trois éprouvettes contenant 10 mL d'acide chlorhydrique, et déclencher le chronomètre pour les trois béchers en même temps. Il faut pour cela un élève qui verse le contenu de deux des éprouvettes dans les deux béchers correspondants, et un autre élève qui verse en même temps le contenu de la troisième éprouvette dans le troisième bécher avec une main, et qui déclenche le chronomètre avec son autre main. Sinon, on fait ces trois mélanges et la mesure de durée les uns à la suite des autres.

Bécher n° :	1	2	3
40 mL de thiosulfate de sodium à :	0,1 mol · L^{-1}	0,02 mol · L^{-1}	0,02 mol · L^{-1}
10 mL d'acide chlorhydrique à :	1 mol · L^{-1}	1 mol · L^{-1}	0,1 mol · L^{-1}
Δt	20 s	2 min 40 s	6 min 15 s

Remarque : pour le bécher n° 2, on pourrait mélanger 40 mL de thiosulfate de sodium à 0,1 mol · L^{-1} avec 10 mL d'acide chlorhydrique à 0,1 mol · L^{-1}.

Du bécher n° 1 au bécher n° 3, la concentration des réactifs décroît, et la durée caractéristique de la réaction augmente. On en conclut que plus la concentration des réactifs est faible, plus la réaction est lente ou, inversement, plus la concentration des réactifs est élevée, plus la transformation est rapide.

◗ *Influence de la température*

On dispose d'un bain eau-glace et d'un bain-marie à 40 °C. Les mélanges précédents ayant été faits à température ambiante, autour de 20 °C, on peut étudier l'influence de la température sur la vitesse de réaction. On propose ici de reproduire le mélange n° 1, mais on pourrait reproduire n'importe lequel des mélanges précédents.

Pour cela, on verse 40 mL de thiosulfate de sodium à 0,1 mol · L^{-1} à l'aide d'une éprouvette graduée dans deux béchers. On place un des béchers dans le bain eau-glace à 0 °C, et le deuxième dans le bain-marie à 40 °C. On prépare deux éprouvettes graduées de 10 mL d'acide chlorhydrique à 1 mol · L^{-1}. On place pendant quelques minutes l'une des deux éprouvettes dans le bain eau-glace et l'autre dans le bain-marie à 40 °C. On réalise ensuite les deux mélanges, puis on mesure la durée au bout de laquelle ces deux solutions deviennent opaques.

Pour le mélange correspondant au bécher n° 1, les résultats sont les suivants :

Température	0 °C	20 °C	40 °C
Δt	43 s	20 s	5 s

On constate que lorsque la température augmente, la durée caractéristique de la réaction diminue. On peut donc dire que lorsque la température augmente, la réaction est plus rapide.

› Démarche avancée

1. a. D'après le document 2, le mélange de thiosulfate de sodium et d'acide chlorhydrique dans les conditions proposées finit par devenir opaque. On peut donc placer une feuille de papier marquée d'une croix sous le bécher, ou dessiner une croix au marqueur sous le bécher, et voir, une fois le mélange réalisé, au bout de combien de temps celle-ci ne sera plus visible.

b. On peut préparer trois mélanges comme proposé ci-dessous. Les durées caractéristiques Δt de la transformation pour chacun des mélanges sont données dans le tableau ci-dessous :

Bécher n° :	1	2	3
40 mL de thiosulfate de sodium à :	0,1 mol · L^{-1}	0,02 mol · L^{-1}	0,02 mol · L^{-1}
10 mL d'acide chlorhydrique à :	1 mol · L^{-1}	1 mol · L^{-1}	0,1 mol · L^{-1}
Δt	20 s	2 min 40 s	6 min 15 s

Remarque : pour le bécher n° 2, on pourrait mélanger 40 mL de thiosulfate de sodium à 0,1 mol · L^{-1} avec 10 mL d'acide chlorhydrique à 0,1 mol · L^{-1}.

c. Du bécher n° 1 au bécher n° 3, la concentration des réactifs décroît et la durée caractéristique de la réaction augmente. On en conclut que plus la concentration des réactifs est faible, plus la réaction est lente ou, inversement, plus la concentration des réactifs est élevée, plus la transformation est rapide.

2. On propose ici de reproduire le mélange n° 1, mais on pourrait reproduire n'importe lequel des mélanges précédents. Les mesures précédentes sont faites à température ambiante (environ 20 °C). Il faut ici préparer les éprouvettes graduées contenant les solutions, et les placer quelques minutes dans le bain-marie à 0 °C pour celles qui serviront au mélange à 0 °C, et dans le bain-marie à 40 °C pour celles qui serviront au mélange à 40 °C.

On relève alors la durée au bout de laquelle la solution devient opaque pour le mélange correspondant au bécher n° 1 :

Température	0 °C	20 °C	40 °C
Δt	43 s	20 s	5 s

On constate que lorsque la température augmente, la durée caractéristique de la réaction diminue. On peut donc dire que lorsque la température augmente, la réaction est plus rapide.

› Démarche élémentaire

1. a. On réalise les mélanges demandés, on déclenche le chronomètre au moment du mélange puis on relève la durée Δt au bout de laquelle la croix sous le bécher n'est plus visible :

Bécher n° :	1	2	3
Δt	20 s	2 min 40 s	6 min 15 s

b. Du bécher n° 1 au bécher n° 3, la concentration des réactifs décroît et la durée caractéristique de la réaction augmente. On en conclut que plus la concentration des réactifs est faible, plus la réaction est lente ou, inversement, plus la concentration des réactifs est élevée, plus la transformation est rapide.

2. a. Les mesures précédentes sont faites à température ambiante (environ 20 °C). Il faut préparer les éprouvettes graduées contenant les solutions et les placer quelques minutes dans le bain-marie à 0 °C pour celles qui serviront au mélange à 0 °C et dans le bain-marie à 40 °C pour celles qui serviront au mélange à 40 °C.

On relève alors la durée au bout de laquelle la solution devient opaque pour le mélange correspondant au bécher n° 1 :

Température	0 °C	20 °C	40 °C
Δt	43 s	20 s	5 s

b. On constate que lorsque la température augmente, la durée caractéristique de la réaction diminue. On peut donc dire que lorsque la température augmente, la réaction est plus rapide.

p. 93 **ACTIVITÉ 4**

Suivi cinétique d'une transformation

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

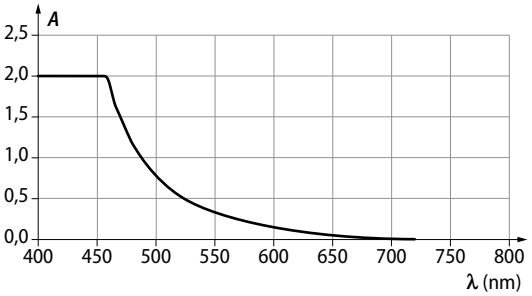
Cette activité permet de mettre en œuvre le suivi temporel d'une transformation chimique en utilisant la spectrophotométrie. L'exploitation des mesures se fait ici à l'aide du langage de programmation Python. Un dosage par étalonnage doit préalablement être réalisé pour déterminer l'expression numérique reliant l'absorbance à la concentration en quantité de matière de diiode.

Avec les solutions de diiode proposées, l'absorbance dépasse la valeur de 2,0 jusqu'à une longueur d'onde de 460 nm environ. Nous avons décidé de réaliser le suivi temporel à 458 nm, ce qui correspond au maximum d'absorption (hors saturation) pour une solution de diiode à $2{,}5 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

La solution de diiode à $5{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} entraîne la saturation du spectrophotomètre jusqu'à 500 nm. On a donc décidé de l'utiliser pour préparer l'échelle de teintes, mais de l'exclure des mesures d'absorbance.

› Expérience et exploitation

1. Après avoir fait le blanc, on trace le spectre d'une solution de diiode de concentration $2{,}5 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}. On obtient le spectre suivant :



On constate que jusqu'à 458 nm environ, le spectrophotomètre est en saturation.

On choisit donc de faire les mesures d'absorbance à une longueur d'onde où le spectrophotomètre ne sera pas à saturation. On prendra $\lambda_{max} = 458$ nm.

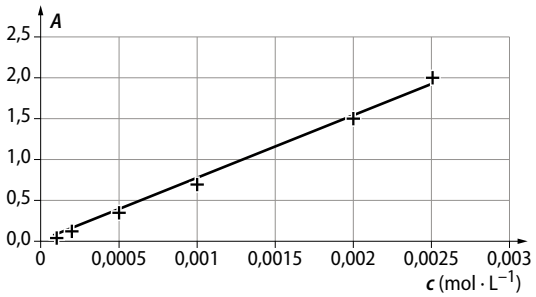
Il faut déterminer le coefficient de proportionnalité k entre *A* et *c*. On réalise six solutions étalons à partir de la solution-mère de diiode, puis on mesure l'absorbance de toutes ces solutions. On trace alors le graphe représentant l'absorbance en fonction de la concentration et on modélise les points expérimentaux par une droite dont le coefficient directeur vaut k.

On peut, par exemple réaliser les solutions ci-après :

Solution	**S_1**	**S_2**	**S_3**
Pipette jaugée	1 mL	2 mL	5 mL
Fiole jaugée	50 mL	50 mL	50 mL
Concentration en quantité de matière (mol · L^{-1})	$1{,}0 \times 10^{-4}$	$2{,}0 \times 10^{-4}$	$5{,}0 \times 10^{-4}$
Absorbance	$4{,}04 \times 10^{-2}$	$1{,}22 \times 10^{-1}$	$3{,}51 \times 10^{-1}$

Solution	S_4	S_5	S_6
Pipette jaugée	10 mL	20 mL	25 mL
Fiole jaugée	50 mL	50 mL	50 mL
Concentration en quantité de matière ($mol \cdot L^{-1}$)	$1,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$
Absorbance	$7,0 \times 10^{-1}$	1,51	2,0

On obtient le graphe ci-dessous :



On trouve $k = 773\ L \cdot mol^{-1}$.

On déclenche un suivi temporel de l'absorbance du mélange, en ayant réglé le spectrophotomètre à la longueur d'onde $\lambda_{max} = 458$ nm.

Remarque : Le spectre d'absorbance de la solution mère S_0 de concentration $5,0 \times 10^{-3}\ mol \cdot L^{-1}$ montre une saturation du spectrophotomètre jusqu'à environ 500 nm. On pourrait l'inclure dans l'échelle de teintes, à condition de faire les mesures d'absorbance et toutes celles qui suivent en réglant le spectrophotomètre à 500 nm. Il faudrait dans ce cas réaliser un mélange qui donnerait un concentration plus élevée en diiode à l'état final (sinon, les valeurs d'absorbance seraient trop faibles et l'incertitude relative des mesures serait trop importante). Par exemple, on pourrait suivre le mélange de 10 mL d'une solution d'iodure de potassium à $0,5\ mol \cdot L^{-1}$ et de 10 mL de peroxodisulfate de potassium à $5,0 \times 10^{-3}\ mol \cdot L^{-1}$ pendant 15 minutes.

2. $S_2O_8^{2-}\ (aq) + 2\ I^-\ (aq) \rightarrow I_2\ (aq) + 2\ SO_4^{2-}\ (aq)$

3. a. Ligne 3 : On complète avec les valeurs expérimentales de *t*.

Ligne 4 : On complète avec les valeurs expérimentales de A.

Ligne 8 : On complète la valeur de k trouvée à la question **2. c** : `CI2.append(A[i]/773)`

Ligne 16 : On calcule la concentration en quantité de matière initiale de $S_2O_8^{2-}$:

$$C_0(S_2O_8^{2-}) = \frac{n_0(S_2O_8^{2-})}{V_{total}} = \frac{C_0(S_2O_8^{2-}) \cdot V(S_2O_8^{2-})}{V_{total}}$$

$$= \frac{2,5 \times 10^{-3} \times 10,0 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3} + 10,0 \times 10^{-3}}$$

$$= 1,25 \times 10^{-3}\ mol \cdot L^{-1}.$$

On complète alors la ligne de code : `C0S = 0.00125`

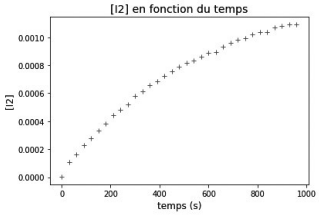
Ligne 21 : Au cours de la transformation, on peut écrire à chaque instant que :

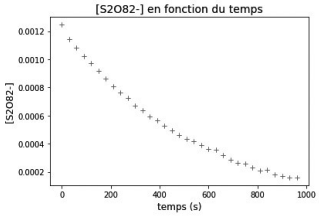
$[S_2O_8^{2-}] = [S_2O_8^{2-}]_0 - [I_2]$. Avec les notations adoptées dans le programme, on complète la ligne de code : `CS.append(C0S-CI2[i])`

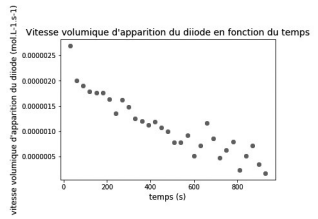
Remarque : l'intégralité du programme est disponible sur le site enseignant http://espace-lycee.editions-bordas.fr/ et sur le manuel numérique enseignant.

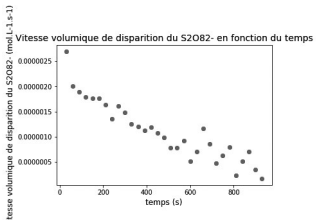
On peut éventuellement demander aux élèves de compléter des lignes de programmation sur le calcul de la vitesse volumique de disparition des ions peroxodisulfate, de la vitesse volumique d'apparition du diiode, ou sur le tracé de certains graphiques. On peut aussi demander aux élèves d'interpréter l'évolution des vitesses volumiques représentées.

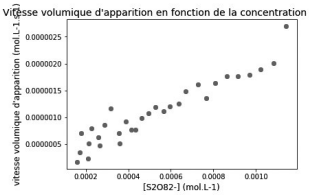
b. On entre les valeurs obtenues par le système d'acquisition et on exécute le fichier. On obtient les résultats suivants :

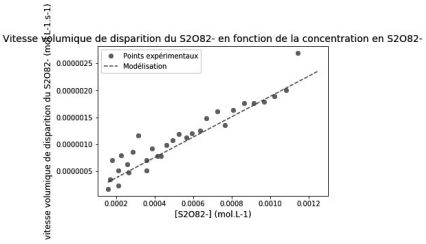












Remarque : On constate que l'ajout des valeurs ultérieures de l'absorbance donne un graphe de la vitesse volumique en fonction de la concentration en $S_2O_8^{2-}$ beaucoup plus bruité, en particulier vers les faibles valeurs de concentration et de vitesse. Cela s'explique par le fait qu'une petite incertitude sur la valeur de l'absorbance (due à la précision du spectrophotomètre) donne une incertitude importante sur la valeur de la vitesse. Les valeurs les plus fiables de la vitesse sont celles pour lesquelles deux valeurs d'absorbance successives sont assez éloignées, donc celles du début de réaction.

› Conclusion

4. D'après la modélisation réalisée, on a bien proportionnalité entre la vitesse volumique de disparition des ions $S_2O_8^{2-}$ et la concentration en quantité de matière de ces ions. La réaction est bien d'ordre 1 par rapport aux ions peroxodisulfate.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel

p. 98

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car une transformation peut être lente et ne durer que quelques minutes.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car il existe des transformations lentes où tous les réactifs et les produits sont incolores. Ces transformations ne seront donc pas suivies par spectrophotométrie, mais pourront l'être par manométrie, ou conductimétrie si les espèces en jeu le permettent.

2 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car un facteur cinétique permet d'accélérer ou de ralentir une transformation mais n'a pas d'influence sur l'état final d'un système chimique : à la fin, il y aura autant de produits formés, mais en une durée plus ou moins longue.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car les seuls facteurs cinétiques sont la température et la concentration des réactifs. Ce ne sont pas des espèces chimiques. Les espèces chimiques susceptibles d'accélérer une transformation sont des catalyseurs.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car un catalyseur accélère une transformation mais n'a pas d'influence sur l'état final d'un système chimique. Avec un catalyseur, le même état final sera atteint plus rapidement que sans catalyseur.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car un catalyseur est consommé puis régénéré au cours de la transformation. Il n'apparaît pas dans le bilan réactionnel. On le note parfois au-dessus de la flèche de l'équation de réaction.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la vitesse volumique de disparition d'un réactif est l'opposé de la dérivée temporelle de la concentration en quantité de matière du réactif.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car il manque le signe moins « − ». En effet, le réactif disparaît au cours de la transformation, donc sa concentration en quantité de matière diminue au cours du temps. La dérivée temporelle de la concentration en quantité de matière du réactif est donc négative. Or la vitesse volumique de disparition d'un réactif est positive, on met donc un signe moins « − ».

5 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le temps de demi-réaction n'est pas la moitié du temps nécessaire pour arriver à la fin de la transformation. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final.
La proposition C est une bonne réponse. En effet, le graphique représente l'évolution de la quantité de matière d'un réactif au cours du temps.
La quantité de matière finale de ce réactif est nulle. C'est donc le réactif (ou un des réactifs) limitant(s).
Notons A ce réactif et α le nombre stœchiométrique qui le précède dans l'équation de réaction. On a donc :

• $n(\text{A})(t) = n_0(\text{A}) - \alpha \cdot x$ donc $x = \dfrac{n_0(\text{A}) - n(\text{A})(t)}{\alpha}$. En particulier, $x(t_{1/2}) = \dfrac{n_0(\text{A}) - n(\text{A})(t_{1/2})}{\alpha}$.

• $n_f(A) = n_0(A) - \alpha \cdot x_f = 0$. Soit : $x_f = \frac{n_0(A)}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \cdot n_0(A)$.

Donc $\frac{x_f}{2} = \frac{n_0(A)}{2\alpha} = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{n_0(A)}{2}\right)$.

Or, par définition, $x(t_{1/2}) = \frac{x_f}{2}$. Donc :

$$\frac{n_0(A) - n(A)(t_{1/2})}{\alpha} = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{n_0(A)}{2}\right).$$

On en déduit que $n(A)(t_{1/2}) = \frac{n_0(A)}{2}$.

On peut donc déduire le temps de demi-réaction à partir de cette courbe : le temps de demi-réaction est l'abscisse du point d'ordonnée $\frac{n_0(A)}{2}$.

Le temps de demi-réaction est donc la durée au bout de laquelle la quantité de matière d'un réactif limitant vaut la moitié de sa quantité de matière initiale.

6 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car une réaction peut être d'ordre 1 par rapport à un réactif A sans que le nombre stœchiométrique devant A soit 1.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car il est possible qu'il y ait d'autres réactifs que A et que la réaction soit d'ordre 1 par rapport à A.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car un intermédiaire réactionnel peut être formé au cours de n'importe quelle étape du mécanisme réactionnel, sauf la dernière, puisqu'il doit être consommé au cours d'une étape ultérieure.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car c'est un catalyseur qui est consommé puis régénéré au cours du mécanisme réactionnel.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car un site accepteur de doublet d'électrons est un site de faible densité électronique. Or un site portant une charge partielle négative est un site de forte densité électronique.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car un site accepteur de doublet d'électrons est un site de faible densité électronique. Or une double liaison est un site de forte densité électronique.

9 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car une flèche courbe part d'un site donneur de doublet d'électrons. Or un élément porteur d'une lacune électronique est un site accepteur de doublet d'électrons.
La proposition C est une bonne réponse.

10 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, en augmentant le volume du milieu réactionnel, on diminue la concentration des réactifs. Or, pour augmenter la fréquence des chocs efficaces, il faut augmenter la concentration des réactifs.

Acquérir les bases *p. 99*

› 1. Modélisation macroscopique

11 **1.** Une transformation rapide dure moins que la persistance rétinienne, elle ne peut pas être suivie par un appareil de mesure courant. Une transformation lente peut être suivie au laboratoire par un appareil de mesure courant.

2. ❶ Il y a apparition de diiode, seule espèce colorée de cette transformation. On pourrait suivre cette transformation avec un spectrophotomètre (réponse **b.**). Deux des réactifs sont des ions, on pourrait donc aussi utiliser un conductimètre (réponse **a.**). Un des réactifs est l'ion oxonium dont on peut suivre la disparition par mesure de pH. On peut donc également utiliser un pH-mètre (réponse **d.**).

❷ Il y a formation d'une espèce gazeuse. On peut donc utiliser un manomètre (réponse **c.**). Des ions sont présents au niveau des réactifs et des produits, on peut donc aussi utiliser un conductimètre (réponse **a.**). Un des réactifs est l'ion oxonium, donc on peut utiliser un pH-mètre (réponse **d.**).

❸ Des ions apparaissent au cours de la transformation, dont des ions oxonium. On pourrait utiliser un conductimètre (réponse **a.**) ou un pH-mètre (réponse **d.**).

12 **1.** Dans la réaction étudiée, il se forme du dihydrogène gazeux. On peut donc suivre l'évolution de la transformation en mesurant la pression du gaz qui s'échappe, directement reliée à la quantité de matière de dihydrogène.

2. Dans les trois expériences menées, seule la concentration de l'ion oxonium varie. Le facteur cinétique étudié est donc la concentration en réactifs.

3. La concentration des réactifs est un facteur cinétique, c'est-à-dire que plus la concentration en réactifs est élevée, plus la réaction est rapide, donc plus les produits se forment rapidement, et plus l'avancement de la réaction augmente rapidement.

La courbe **A** correspond donc à l'expérience où la concentration en ions oxonium est la plus élevée, c'est l'expérience 1.

La courbe C correspond à l'expérience où la concentration en ions oxonium est la plus faible, c'est l'expérience 2.
La courbe B correspond à l'expérience où la concentration en ions oxonium est intermédiaire, c'est l'expérience 3.

13 **1.** Les ions Co^{2+}, le zinc, le fer et le cuivre jouent le rôle de catalyseur car ils peuvent accélérer la réaction mais n'apparaissent pas dans son bilan réactionnel.

2. Les ions Co^{2+} donnent lieu à une catalyse homogène car ils forment une seule phase liquide avec les réactifs. Le zinc, le fer et le cuivre donnent lieu à une catalyse hétérogène car ces éléments sont solides, donc dans une phase différente des réactifs qui sont tous en phase liquide.

3. Dans un contenant métallique, la réaction de décomposition de l'eau de Javel serait accélérée, et le détergent serait rapidement inactif.

14 **1.** La pectinestérase joue le rôle de catalyseur car elle accélère la réaction de coagulation des pectines.

2. Le catalyseur est ici une enzyme, il s'agit donc d'une catalyse enzymatique permettant d'accélérer un processus biochimique.

› 2. Suivi temporel

15 **1.** La vitesse volumique d'apparition d'un produit est définie par : $v_{\text{Produit}} = \dfrac{\mathrm{d}[\text{Produit}]}{\mathrm{d}t}$, avec [Produit] la concentration en quantité de matière du produit.

2. La dérivée d'une courbe en un point correspond au coefficient directeur de la tangente à la courbe en ce point. Pour déterminer la vitesse volumique d'apparition d'un produit à un instant *t*, il faut tracer la tangente à la courbe [Produit](*t*) à l'instant *t*, puis déterminer son coefficient directeur.

3. On peut calculer la vitesse volumique d'apparition du produit au point *i* par le calcul suivant :

$$v_{\text{Produit}}(i) = \frac{[\text{Produit}](i+1) - [\text{Produit}](i-1)}{t(i+1) - t(i-1)}$$

16 **1.** On calcule la vitesse d'apparition du diiode aux points d'indice 2 et 4 :

$$v_{I_2}(2) = \frac{\left([I_2]_3 - [I_2]_1\right)}{t_3 - t_1} = \frac{4{,}06 - 0{,}00}{434 - 0}$$
$$= 9{,}35 \times 10^{-3}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$v_{I_2}(4) = \frac{[I_2]_5 - [I_2]_3}{t_5 - t_3} = \frac{5{,}84 - 4{,}06}{930 - 434}$$
$$= 3{,}59 \times 10^{-3}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. On compare ces deux vitesses en calculant leur rapport :

$\dfrac{v_{I_2}(2)}{v_{I_2}(4)} = \dfrac{9{,}35 \times 10^{-3}}{3{,}59 \times 10^{-3}} = 2{,}61$ (on reprend les valeurs exactes des deux calculs précédents).
La vitesse à l'instant t_2 est presque trois fois plus grande que la vitesse à l'instant t_4.

17 **1.** Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final.

2. a. Cette proposition est fausse car cette relation n'est pas homogène : une durée ne peut pas être égale à un avancement.

b. Cette proposition est fausse car cette relation n'est pas homogène.

c. Cette proposition est fausse car le temps de demi-réaction se définit en fonction de l'avancement final x_f, pas de l'avancement maximal x_{max}.

d. Cette proposition est vraie car à $t_{1/2}$, l'avancement vaut la moitié de l'avancement final. Autrement dit, le temps de demi-réaction est l'abscisse du point d'ordonnée $\dfrac{x_f}{2}$.

e. Dans le cas d'une réaction totale, x_f est proportionnel à la quantité de matière du réactif limitant, le coefficient de proportionnalité étant l'inverse du nombre stœchiométrique le précédant. En effet, si on note A le réactif limitant, on a :

$n_f(A) = n_i(A) - \alpha \cdot x_f = 0$, soit : $x_f = \dfrac{n_i(A)}{\alpha} = \dfrac{1}{\alpha} \cdot n_i(A)$.

Or $x(t_{1/2}) = \dfrac{x_f}{2} = \dfrac{n_i(A)}{2\alpha}$.

La relation proposée est donc vraie dans le cas où la réaction considérée est totale ET que le nombre stœchiométrique devant le réactif limitant vaut 1.
Si le nombre stœchiométrique ne vaut pas 1, la relation doit s'écrire :

$$x(t_{1/2}) = \frac{n_i(\text{réactif limitant})}{2 \times \text{nombre stœchiométrique}}$$

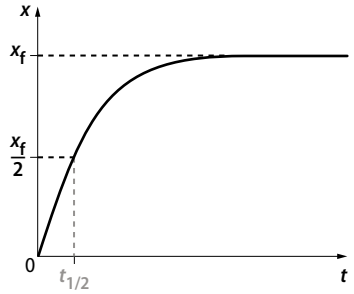
Et si, de plus, la réaction n'est pas totale, on a :
$n_f(A) = n_i(A) - \alpha \cdot x_f$ donc :

$$x_f = \frac{n_i(A) - n_f(A)}{\alpha}.$$

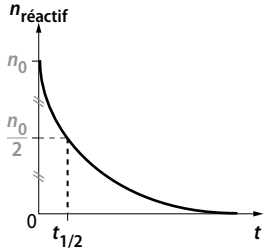
Cette relation est valable même si A n'est pas le réactif limitant. Ainsi, on aura :

$$x(t_{1/2}) = \frac{x_f}{2}$$
$$= \frac{n_i(\text{réactif}) - n_f(\text{réactif})}{2 \times \text{nombre stœchiométrique}}.$$

3. D'après la relation **d**, on peut déterminer le temps de demi-réaction comme suit :



D'après la relation **e**, si on se place dans un cas où la réaction est totale et où le nombre stœchiométrique devant le réactif limitant vaut 1, on déterminerait le temps de demi-réaction de la manière suivante :



18 **1.** Une réaction est d'ordre 1 par rapport à un réactif A si la vitesse volumique d'apparition des produits ou la vitesse volumique de disparition du réactif A sont proportionnelles à la concentration en quantité de matière du réactif A.

2. a. Cette réaction est d'ordre 1. On peut donc écrire :
$v(OCN^-) = k \cdot [urée]$
$v(NH_4^+) = k' \cdot [urée]$
$v(urée) = k'' \cdot [urée]$
avec k, k' et k'' des coefficients de proportionnalité.

b. Graphique **A** :
Il est faux car une vitesse volumique de disparition est positive.

Graphique **B** :
Il est juste, la vitesse volumique d'apparition de OCN^- est bien proportionnelle à la concentration de l'urée.

Graphique **C** :
Au cours de la réaction, la concentration de l'urée diminue. Or, la vitesse volumique d'apparition de NH_4^+ est proportionnelle à la concentration en urée, donc la vitesse volumique d'apparition de NH_4^+ diminue au cours du temps. Cette représentation est donc fausse.

Graphique **D** :
OCN^- étant un produit, sa concentration augmente au cours du temps. Ce graphique est donc faux.

c. Le graphique **A** pourrait représenter l'opposé de la vitesse de disparition de l'urée en fonction de la concentration de l'urée : $-v_{urée}([urée])$.
Le graphique **C** pourrait représenter la concentration de NH_4^+ en fonction du temps : $[NH_4^+](t)$.
Le graphique **D** pourrait représenter la concentration de l'urée en fonction du temps : $[urée](t)$.

› 3. Modélisation microscopique

19 **a.** Les quatre doublets non liants de l'ion chlorure sont des sites donneurs de doublet d'électrons.

b. L'ion hydrogène, comportant une lacune électronique, est un site accepteur de doublet d'électrons.

c. Les deux doublets non liants de l'atome d'oxygène de cet alcool sont des sites donneurs de doublet d'électrons.
L'atome d'hydrogène et l'atome de carbone de part et d'autre de l'atome d'oxygène portent chacun une charge partielle positive car l'oxygène est plus électronégatif que le carbone et l'hydrogène. Ces deux atomes sont donc des sites accepteurs de doublet d'électrons.

d. Le carbone central portant une lacune électronique est un site accepteur de doublet d'électrons.

e. La double liaison C═C est un site donneur de doublet d'électrons.

f. La liaison C═O est polaire, l'atome de carbone portant une charge partielle positive et l'atome d'oxygène portant une charge partielle négative. Le carbone est donc un site accepteur de doublet d'électrons.
Les doublets non liants de l'atome d'oxygène sont des sites donneurs de doublet d'électrons.
La double liaison entre le carbone est l'oxygène est aussi un site donneur de doublet d'électrons.

20 **a.** Fausse. La flèche part du symbole de l'élément Cl alors qu'elle devrait partir d'un des doublets non liants.

b. Fausse. La flèche part du site accepteur et pointe vers le site donneur de doublet d'électrons alors qu'elle devrait partir du site donneur et pointer vers le site accepteur de doublet d'électrons.

c. Juste.

d. Fausse. La flèche part de la charge de l'élément Cl alors qu'elle devrait partir d'un des doublets non liants.

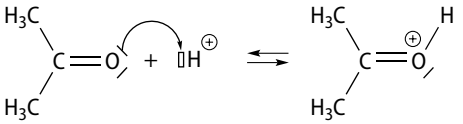
e. Fausse. La flèche est représentée au niveau des produits de la réaction alors qu'elle devrait être représentée au niveau des réactifs.

f. Juste.

21 **1.** L'oxygène étant plus électronégatif que le carbone, la liaison C═O est polarisée, l'atome de carbone portant une charge partielle positive et l'atome d'oxygène une charge partielle négative. L'atome de carbone portant la fonction cétone est donc un site accepteur de doublet d'électrons.
Les doublets non liants de l'atome d'oxygène sont des sites donneurs de doublet d'électrons.
La double liaison entre le carbone et l'oxygène du groupe carbonyle est un site donneur de doublet d'électrons.

2. L'ion hydrogène H^+ présente une lacune électronique, c'est un site accepteur de doublet d'électrons. En présence d'un ion hydrogène, c'est donc un site donneur de doublets d'électrons qui sera actif. Ici, c'est un des doublets non liants de l'atome d'oxygène de la cétone ou la double liaison entre le carbone et l'oxygène de la fonction cétone.

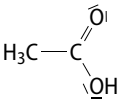
3. **a** et **b.**



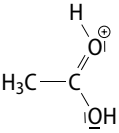
22 **1. a.** Un intermédiaire réactionnel est une espèce formée au cours d'une étape du mécanisme puis consommée au cours d'une étape ultérieure.

b. Un catalyseur est une espèce consommée au cours d'une étape du mécanisme réactionnel puis régénérée au cours d'une étape ultérieure.

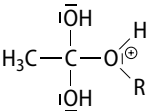
2. a.

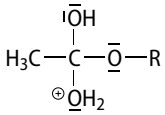
• L'espèce  est consommée lors de l'étape ❶ et n'apparaît plus dans le mécanisme : c'est un **réactif**.

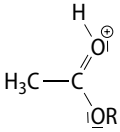
• L'espèce H^+ est consommée lors de l'étape ❶ et régénérée lors de l'étape ❺ : c'est un **catalyseur**.

• L'espèce  est formée lors de l'étape ❶ et consommée lors de l'étape ❷ : c'est un **intermédiaire réactionnel**.

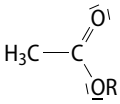
• L'espèce est consommée lors de l'étape ❷ et n'apparaît plus dans le mécanisme : c'est un **réactif**.

• L'espèce  est formée lors de l'étape ❷ et consommée lors de l'étape ❸ : c'est un **intermédiaire réactionnel**.

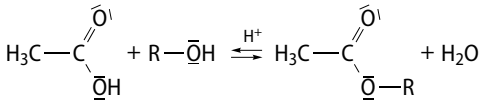
• L'espèce  est formée lors de l'étape ❸ et consommée lors de l'étape ❹ : c'est un **intermédiaire réactionnel**.

• L'espèce  est formée au cours de l'étape ❹ puis consommée lors de l'étape ❺ : c'est un **intermédiaire réactionnel**.

• L'espèce $H—\underline{O}—H$ est formée au cours de l'étape ❹ et n'apparaît plus dans le mécanisme : c'est un **produit**.

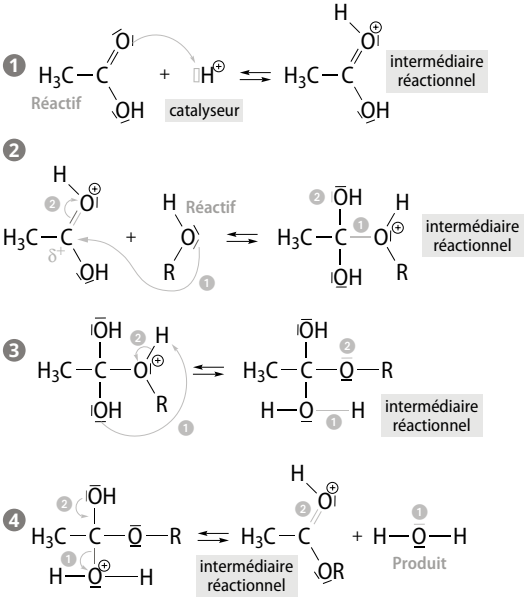
• L'espèce  est formée au cours de l'étape ❺ et n'apparaît pas ailleurs dans le mécanisme : c'est un **produit**.

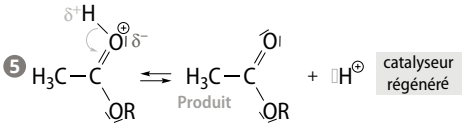
b. En ne faisant figurer que les réactifs et les produits, on retrouve l'équation de la réaction modélisée par ce mécanisme réactionnel :



c. La température et la concentration des réactifs sont des facteurs cinétiques. Leur augmentation entraîne une augmentation de la fréquence des chocs efficaces entre entités, donc une diminution de la durée de la transformation.

3.





Faire le point avant d'aller plus loin p. 101

◗ ***Expliquer ce qu'est un facteur cinétique, puis en citer deux***.

Un facteur cinétique est un paramètre expérimental que l'on peut faire varier pour modifier la durée d'une transformation. La température et la concentration des réactifs sont des facteurs cinétiques.

◗ ***Expliquer l'action des facteurs cinétiques d'un point de vue microscopique.***

Une augmentation de la température conduit à une agitation thermique plus importante. Ainsi, les chocs entre réactifs sont plus fréquents et plus violents, donc les chocs efficaces plus fréquents, les étapes élémentaires composant le mécanisme de la réaction sont plus rapides, et la réaction avance plus rapidement.

Lorsque la concentration en réactifs augmente, il y a plus d'entités de réactifs par unité de volume, donc les chocs entre les entités de réactifs sont plus fréquents et les chocs efficaces sont plus fréquents, donc la réaction avance plus rapidement.

◗ ***Définir la vitesse volumique d'apparition d'un produit.***

La vitesse volumique d'apparition d'un produit est définie par : $v_{\text{Produit}} = \dfrac{\text{d[Produit]}}{\text{d}t}$, avec [Produit] la concentration en quantité de matière du produit.

◗ ***Expliquer le modèle de la flèche courbe.***

Une flèche courbe symbolise les transferts d'électrons entre entités au cours d'une étape élémentaire d'un mécanisme réactionnel. Elle part d'un site donneur de doublet d'électrons et pointe vers un site accepteur de doublet d'électrons.

◗ ***Définir un site donneur et un site accepteur de doublet d'électrons.***

Un site donneur de doublet d'électrons est un site de forte densité électronique : un doublet non liant, une double liaison, ou plus rarement un doublet liant attaché à un atome portant une charge partielle négative.

Un site accepteur de doublet d'électrons est un site de faible densité électronique : un élément portant une lacune électronique, ou un atome portant une charge partielle positive.

◗ ***Pour la réaction A → B + C d'ordre 1, donner deux expressions de la vitesse volumique de disparition du réactif.***

La vitesse volumique de disparition du réactif A est définie par : $v_{\text{A}} = -\dfrac{\text{d[A]}}{\text{d}t}$, avec [A] la concentration en quantité de matière du réactif A. Dans le cas d'une réaction d'ordre 1, on a de plus : $v_{\text{A}} = k \cdot [\text{A}]$ avec k un coefficient de proportionnalité en s^{-1}.

◗ ***Définir le temps de demi-réaction et expliquer comment le déterminer graphiquement.***

Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final.

On peut le déterminer sur le graphique représentant l'avancement en fonction du temps : on relève la valeur de l'avancement final comme étant la valeur de l'asymptote sur l'axe des ordonnées, on divise cette valeur par deux, puis on détermine l'abscisse correspondante.

◗ ***Définir un catalyseur et expliquer comment l'identifier dans un mécanisme réactionnel.***

Un catalyseur est une espèce susceptible d'accélérer une transformation chimique sans apparaître dans son bilan réactionnel. Il est consommé puis régénéré en égale proportion.

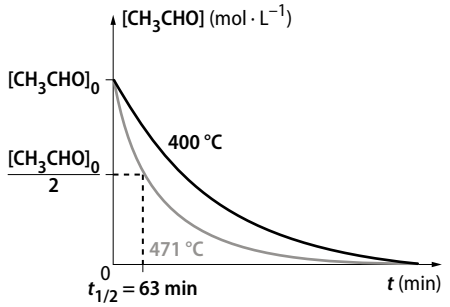
Dans un mécanisme réactionnel, un catalyseur est consommé au cours d'une des étapes puis régénéré au cours d'une étape ultérieure.

Exercices similaires aux exercices résolus p. 102 et 103

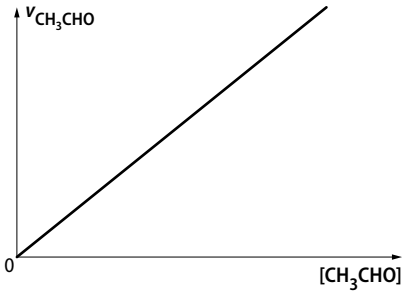
24 **1.** La réaction étudiée met en jeu des gaz, on peut donc suivre son évolution par mesure de pression.

2. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final. Ici, le réactif limitant est entièrement consommé en fin de réaction, donc le temps de demi-réaction est l'abscisse du point d'ordonnée $[CH_3CHO]_0/2$, soit environ 63 min (voir graphique ci-dessous).

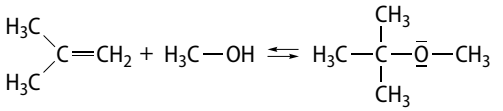
3. La température est un facteur cinétique donc, à 400 °C, l'état final sera atteint plus lentement qu'à 477 °C.



4. Cette réaction étant d'ordre 1, la vitesse volumique de disparition du CH_3CHO est proportionnelle à sa concentration en quantité de matière.

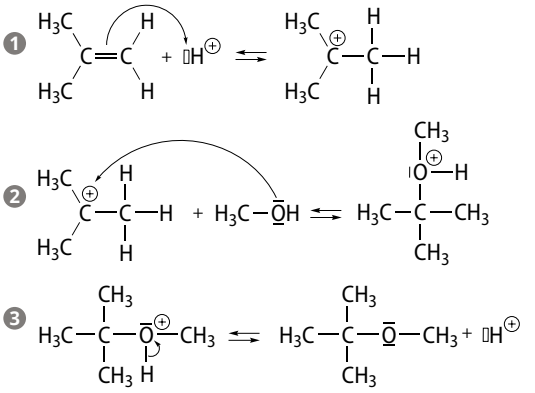


26 **1.** Pour retrouver l'équation de la réaction, on supprime les espèces qui se trouvent à gauche et à droite des flèches de réaction pour ne conserver que les réactifs et les produits.
La réaction modélisée par ce mécanisme a pour équation :

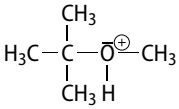


2. Dans l'étape ❶, la double liaison C=C est un site donneur de doublet d'électrons et l'ion hydrogène H^+, porteur d'une lacune électronique, est un site accepteur de doublet d'électrons.
Dans l'étape ❷, les doublets non liants de l'oxygène sont des sites donneurs de doublet d'électrons et le carbocation (carbone chargé positivement), porteur d'une lacune électronique, est un site accepteur de doublet d'électrons.

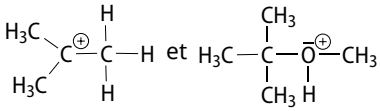
3. Les flèches courbes partent d'un site donneur de doublet d'électrons et pointent vers un site accepteur de doublet d'électrons.



Lors de l'étape ❷, un doublet non liant de l'oxygène devient liant entre le carbone et l'oxygène. On trouve ainsi la formule de l'espèce A :



4. Les intermédiaires réactionnels sont des espèces qui sont formées lors d'une étape puis consommées lors d'une étape ultérieure. Il s'agit donc des espèces de formules :



5. L'ion hydrogène est consommé lors de l'étape ❶ et régénéré lors de l'étape ❸, c'est donc un catalyseur.

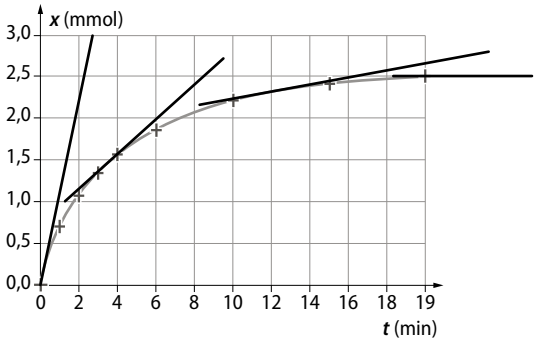
S'entraîner pour maîtriser *p. 104*

27 **1. a.** On peut dresser un tableau d'avancement pour répondre à cette question.
On a : $n(C_3H_6O) = \mathbf{5}x$,
donc $[C_3H_6O\ (aq)] = \dfrac{n(C_3H_6O)}{V} = \dfrac{\mathbf{5}x}{V}$.

b. La propanone est un produit de la réaction, donc on a :

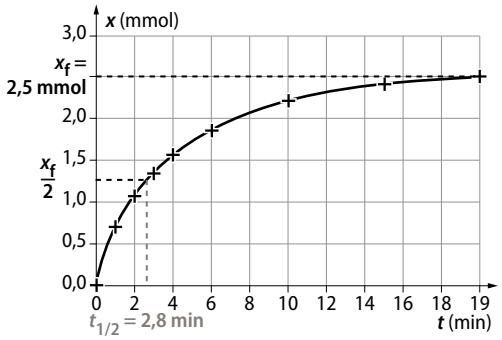
$$v_{C_3H_6O} = \frac{d\left[C_3H_6O\ (aq)\right]}{dt} = \frac{d\left(\frac{5x}{V}\right)}{dt} = \frac{5}{V} \cdot \frac{dx}{dt},$$ car V est constant.

2. a. La vitesse volumique d'apparition de la propanone est proportionnelle à la dérivée temporelle de l'avancement, elle est donc proportionnelle à la pente de la tangente à la courbe $x(t)$. Or la pente de la tangente à la courbe $x(t)$ (en noir sur le graphique ci-dessous) diminue au cours du temps, donc la vitesse volumique d'apparition de la propanone diminue au cours du temps.



b. Au cours de la réaction, il y a de moins en moins de réactifs. La concentration des réactifs est le facteur cinétique expliquant cette évolution.

3. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final. On a : $x(t_{1/2}) = \dfrac{x_f}{2}$. D'après le graphique, $t_{1/2}$ vaut environ 2,8 minutes.



28 **1. a.** On a :
$n(H_3O^+) = n_0(H_3O^+) - 2x$.

b. On a :

$$[H_3O^+] = \frac{n(H_3O^+)}{V} = \frac{n_0(H_3O^+) - 2x}{V}$$

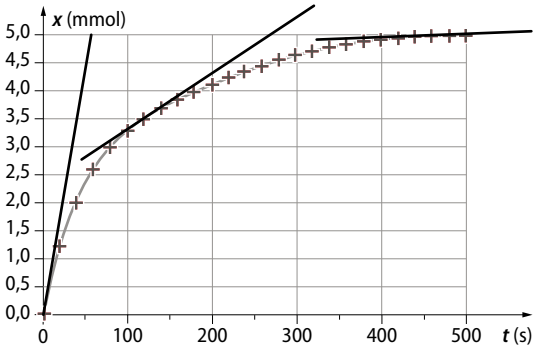
soit $[H_3O^+] = [H_3O^+]_0 - \frac{2x}{V}$.

Les ions oxonium étant un réactif, on a :

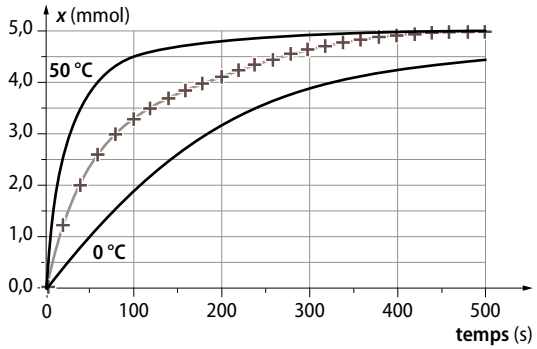
$$v_{H_3O^+} = -\frac{d[H_3O^+]}{dt} = -\frac{d\left([H_3O^+]_0 - \frac{2x}{V}\right)}{dt}$$
$$= \frac{2}{V} \cdot \frac{dx}{dt},$$

car $[H_3O^+]_0$ et V sont des constantes.

2. a. La vitesse volumique de disparition des ions oxonium est proportionnelle à la dérivée temporelle de l'avancement, elle est donc proportionnelle à la pente de la tangente à la courbe $x(t)$.
La pente de la tangente à la courbe $x(t)$ diminue au cours du temps, donc la vitesse volumique de disparition des ions oxonium diminue au cours du temps.



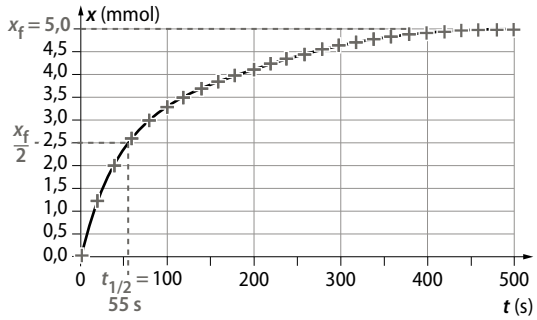
b. Lorsque la température varie, l'avancement final reste le même. Il sera atteint plus rapidement si la température est plus élevée, et plus lentement si la température est plus faible.



c. Une augmentation de la température conduit à une agitation thermique plus importante. Ainsi, les chocs entre réactifs sont plus fréquents et plus violents, donc les chocs efficaces plus fréquents, et la réaction avance plus rapidement.

3. a. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final.

b. L'avancement final à 20 °C vaut $5{,}0 \times 10^{-3}$ mol. On cherche donc l'abscisse correspondant à l'avancement de $2{,}5 \times 10^{-3}$ mol. On trouve un temps de demi-réaction entre 50 s et 60 s. Ainsi, $t_{1/2} = 55$ s.



29 **1.** Ici, l'acide sulfurique concentré sert à apporter les ions oxonium H_3O^+ nécessaires à la transformation. On pourrait répondre rapidement en disant qu'il s'agit d'un catalyseur, mais cela est une erreur. En effet, les ions H_3O^+ apparaissent dans le bilan de la réaction, c'est donc bien un réactif de cette transformation.

2. a. En faisant le bilan de ces deux équations, c'est-à-dire en supprimant les espèces qui apparaissent à la fois à gauche et à droite des flèches de réaction, on retrouve l'équation de la réaction :

$$5\ H_2O_2\ (aq) + C_4H_4O_6^{2-}\ (aq) + 2\ H_3O^+\ (aq) \rightarrow 4\ CO_2\ (g) + 10\ H_2O\ (\ell)$$

b. Les ions Co^{2+} permettent d'accélérer cette transformation : ils jouent ici le rôle de catalyseur.
En effet, ils sont consommés lors de la réaction **1** et sont régénérés lors de la réaction **2**.

c. D'après le graphique, la concentration des ions Co^{3+} est nulle au début de la transformation, puis

elle augmente vers la dixième seconde, et diminue à nouveau à partir de la quarantième seconde. Les ions Co^{3+} sont donc absents en début de réaction. Ils sont formés à partir de la dixième seconde et disparaissent à nouveau à partir de la 40e jusqu'à la 80e seconde. Les ions Co^{3+} sont donc un intermédiaire réactionnel.

d. Entre la 10e et la 80e seconde, ce sont les ions Co^{3+} qui donnent leur couleur à la solution. La solution est donc rosée.

À partir de la 40e seconde, les ions Co^{2+} se forment car la quantité d'ions Co^{3+} diminue, il s'ajoute donc progressivement à la solution une coloration verdâtre.

e. Les 10 premières secondes, et à partir de la 80e seconde, les ions Co^{3+} sont absents, ce sont les ions Co^{2+} qui sont présents et colorent la solution. La solution est donc verdâtre.

f. Les ions Co^{3+} sont colorés et leur concentration évolue au cours de la transformation. On peut donc suivre l'évolution de la transformation par spectrophotométrie. Pour suivre l'évolution de la concentration en ions Co^{3+}, il faudra régler le spectrophotomètre à la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption des ions Co^{3+}.

30 **1. a.** L'instruction ❷ permet de calculer la concentration du réactif A.

b. L'instruction ❸ permet de représenter la concentration de A en fonction du temps.

c. L'instruction ❶ permet de calculer la vitesse volumique d'apparition du produit D.

2. Si l'on dispose d'un tableau avec les valeurs de la concentration de A et de la concentration de D, le tableau des valeurs de la vitesse volumique d'apparition de D aura deux valeurs en moins, puisqu'on ne peut pas la calculer pour la première valeur et la dernière valeur de la concentration. On peut donc représenter la vitesse volumique d'apparition de D en fonction de la concentration de A avec l'instruction suivante :

```
plt.plot(CA[1:-1],VD,"b+")
```

(le `"b+"` sert à représenter des points en croix noires.)

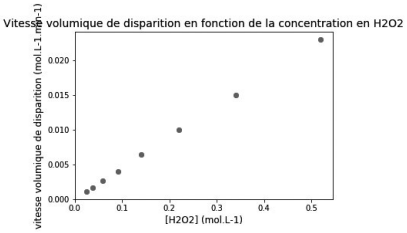
31 **› Démarche experte**

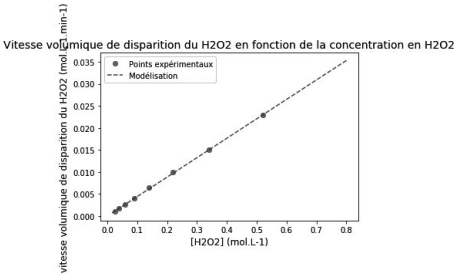
Pour savoir si la réaction est d'ordre 1, on doit représenter la vitesse volumique de disparition de l'eau oxygénée H_2O_2 en fonction de sa concentration. Si les points sont modélisables par une droite passant par l'origine, la réaction est d'ordre 1.

Après avoir entré les valeurs du temps et de la concentration en H_2O_2, on calcule la vitesse volumique de disparition du H_2O_2. On représente ensuite la vitesse volumique de disparition du H_2O_2 en fonction de sa concentration et on modélise les points obtenus par une droite passant par l'origine. On vérifie ensuite si les points correspondent à la droite de modélisation.

Le programme qui permettrait de répondre à la question posée est disponible sur le site enseignant http://espace-lycee.editions-bordas.fr/

Les graphes obtenus sont :





Les points représentant la vitesse volumique de disparition de l'eau oxygénée en fonction de sa concentration peuvent bien être modélisés par une droite passant par l'origine. On peut donc dire que cette réaction est d'ordre 1.

› Démarche avancée

Le programme qui permettrait de répondre à la question posée est disponible sur le site enseignant http://espace-lycee.editions-bordas.fr.

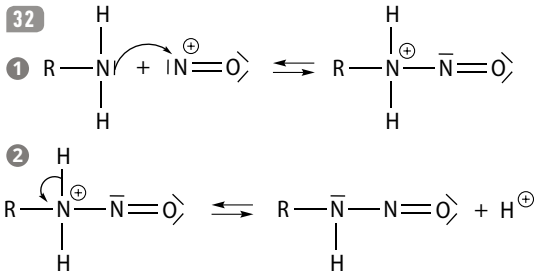
1. On commence par entrer les valeurs de temps et de concentration (lignes 8 à 14 du programme). On calcule ensuite la vitesse volumique de disparition du H_2O_2 du deuxième point à l'avant-dernier point (lignes 17 à 21).

2. On trace le graphe représentant la vitesse volumique de disparition de l'eau oxygénée en fonction de sa concentration (lignes 25 à 32). En exécutant, on obtient le graphe ci-avant (voir « Démarche experte »).

3. On modélise les points expérimentaux par une droite passant par l'origine, et on vérifie si cette modélisation est correcte par visualisation graphique (lignes 35 à 56). En exécutant le programme, on obtient le graphe ci-avant (voir « Démarche experte »).

Les points représentant la vitesse volumique de disparition de l'eau oxygénée en fonction de sa concentration peuvent bien être modélisés par une droite passant par l'origine. On peut donc dire que cette réaction est d'ordre 1.

32



Dans l'étape ❶, le doublet non liant de l'azote de la 4-nitroaniline est un site donneur de doublet d'électrons tandis que l'azote de l'autre réactif, porteur d'une charge positive (donc d'une lacune électronique), est un site accepteur de doublet d'électrons. La flèche courbe part du site donneur et pointe vers le site accepteur de doublet d'électrons.
Dans l'étape ❷, l'azote chargé positivement est un site accepteur de doublet d'électrons. Le doublet liant N—H se rompt pour devenir un doublet non liant sur l'azote.

33 ***Chloroéthane***

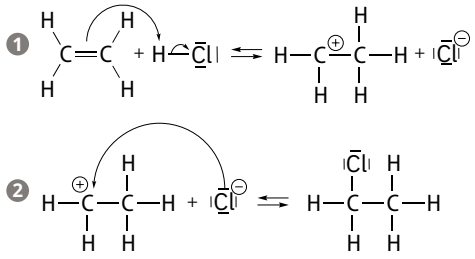
Autrefois utilisé pour la fabrication des essences au plomb, le chloroéthane peut être utilisé comme anesthésiant local. Il est synthétisé à haute température selon le mécanisme suivant (voir manuel).

1. *Recopier le mécanisme réactionnel et ajouter toutes les flèches courbes manquantes en justifiant leur sens.*

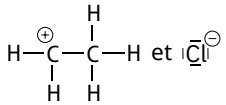
2. *Donner la formule de tous les intermédiaires réactionnels intervenant dans ce mécanisme.*

3. *Établir l'équation de la réaction modélisée.*

1. Dans les réactifs de l'étape ❶, la double liaison est un site donneur de doublet d'électrons. La liaison H—Cl est polarisée, le chlore étant plus électronégatif que l'hydrogène.
L'hydrogène porte une charge partielle positive δ^+, c'est un site accepteur de doublet d'électrons. La flèche courbe part du site donneur et pointe vers le site accepteur de doublet d'électrons.
Dans l'étape ❷, les doublets non liants du chlore sont des sites donneurs de doublet d'électrons, et le carbone chargé positivement est un site accepteur de doublet d'électrons. La flèche courbe part du site donneur et pointe vers le site accepteur de doublet d'électrons.



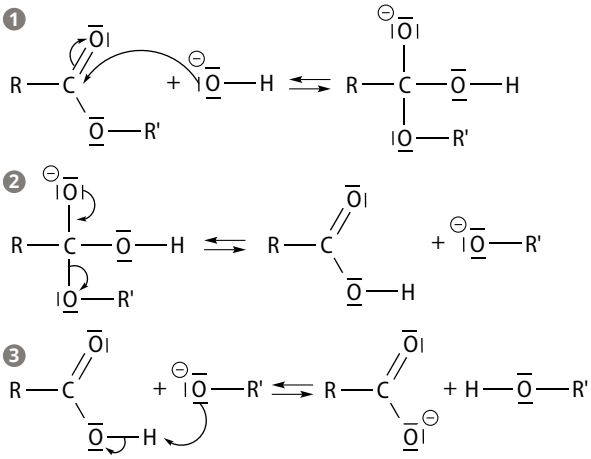
2. Les intermédiaires réactionnels sont des espèces formées au cours d'une étape du mécanisme puis consommées au cours d'une étape ultérieure.
Ils ont pour formule :



3. On trouve l'équation de la réaction en supprimant les intermédiaires réactionnels. La réaction modélisée a pour équation :

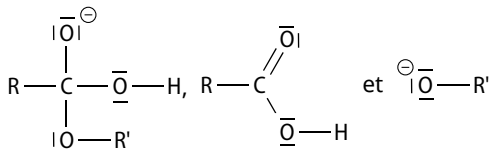
$$H_2C{=}CH_2 + H{-}Cl \rightleftharpoons H_3C{-}CH_2Cl$$

34 **1.**



2. Dans l'étape ❶, les doublets non liants de l'oxygène sont des sites donneurs de doublet d'électrons. Le carbone portant les deux atomes d'oxygène porte une charge partielle positive car la liaison C—O est polarisée, l'oxygène étant plus électronégatif que le carbone. Ce carbone est donc un site accepteur de doublet d'électrons. La flèche courbe modélisant ce transfert électronique génère le départ d'un des doublets liants de la double liaison C═O vers l'oxygène.
Dans l'étape ❸, les doublets non liants de l'oxygène lié à R' sont des sites donneurs de doublet d'électrons. L'hydrogène lié à l'oxygène porte une charge partielle positive car l'oxygène auquel il est lié est plus électronégatif que l'hydrogène. L'hydrogène est donc un site accepteur de doublet d'électrons.

3. Les intermédiaires réactionnels sont des espèces formées lors d'une étape du mécanisme puis consommées lors d'une étape ultérieure. Ici, les intermédiaires réactionnels ont pour formules :



4. La réaction modélisée a pour équation :
$RCOOR' + HO^- \rightleftarrows RCOO^- + R'OH$.

35 Exemple d'exposé oral

Le graphe représente l'évolution temporelle de la concentration en produit formé. Grâce à ce graphe, on peut déterminer le **temps de demi-réaction**, qui représente la durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final. En effet, au temps de demi-réaction, la concentration en produit formé vaut la moitié de la concentration finale du produit, puisque le volume du milieu réactionnel est constant.
Ce graphe permet également de déterminer la **vitesse volumique d'apparition** du produit. En effet, la vitesse volumique d'apparition du produit est la dérivée temporelle de sa concentration. C'est donc le coefficient directeur de la tangente à la courbe représentant la concentration en produit en fonction du temps.
On constate qu'au cours du temps, la pente de la tangente à la courbe [produit](t) diminue, la vitesse volumique d'apparition du produit diminue donc au cours du temps. Ce résultat se comprend grâce au **facteur cinétique** « concentration des réactifs ». En effet, au cours de la transformation, les réactifs disparaissent, et leur concentration diminue. Ainsi, les chocs entre réactifs sont moins fréquents et les **chocs efficaces** moins fréquents. De ce fait, la réaction devient plus lente, et la vitesse volumique d'apparition du produit diminue.

36 Exemple d'exposé oral

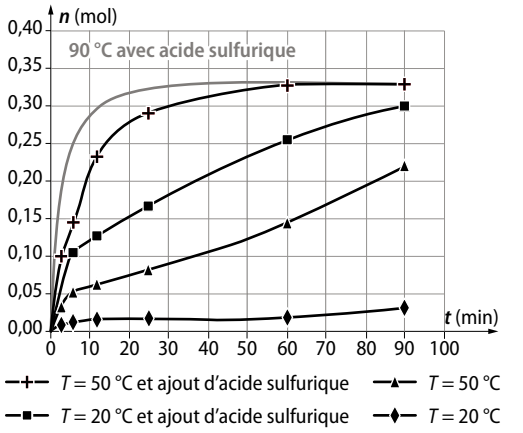
On caractérise la durée d'une transformation chimique par son temps de demi-réaction, qui correspond à la durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final.
On peut modifier la durée d'une transformation en modifiant les facteurs cinétiques : température et concentration des réactifs. Une augmentation de la température ou une augmentation de la concentration des réactifs accélère la transformation.
L'ajout d'un catalyseur adapté peut également accélérer une transformation chimique.

Développer ses compétences p. 107

37 › Analyse

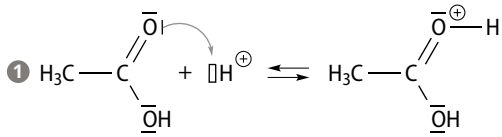
1. a. On constate que la quantité de matière d'éthanoate de butyle formé augmente plus rapidement à 50 °C qu'à 20 °C. Cela met en évidence le facteur cinétique « température ». Au niveau microscopique, lorsque la température augmente, l'agitation thermique augmente et les chocs entre molécules de réactifs sont plus fréquents, donc les chocs efficaces plus fréquents et la réaction plus rapide.
On constate également qu'à 20 °C comme à 50 °C, l'ajout d'acide sulfurique accélère la réaction. Il s'agit donc d'un catalyseur. Au niveau microscopique, le catalyseur modifie le mécanisme réactionnel en étapes élémentaires plus rapides.

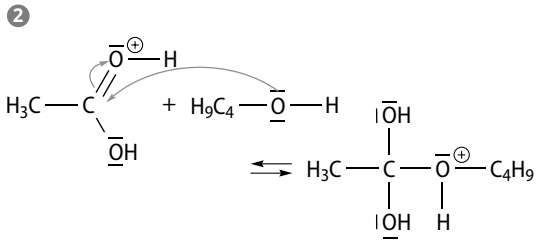
b. À 90 °C, avec ajout d'acide sulfurique, la réaction sera plus rapide qu'à 50 °C avec ajout d'acide sulfurique car la température est un facteur cinétique. La courbe représentant la quantité d'éthanoate de butyle formé augmentera donc plus rapidement. Son asymptote, cependant, sera la même que pour l'expérience menée à 50 °C avec ajout d'acide sulfurique car l'état final est inchangé. On aura donc $n_{final} = 0{,}33$ mol.

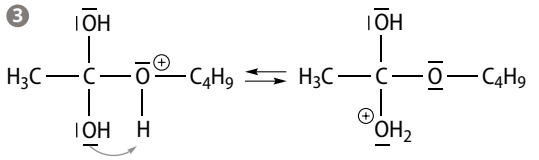


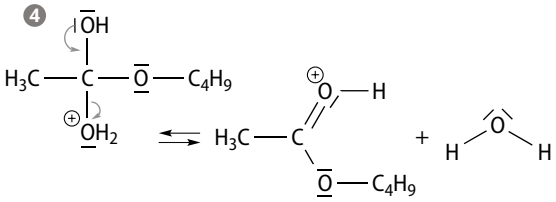
2. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final.
La quantité finale d'éthanoate de butyle formé vaut 0,33 mol. Donc le temps de demi-réaction est la durée pour laquelle la quantité d'éthanoate de butyle formé vaut 0,33/2 = 0,17 mol. Graphiquement, on trouve environ $t_{1/2} = 8$ min.

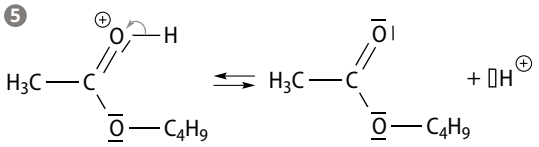
3. a.







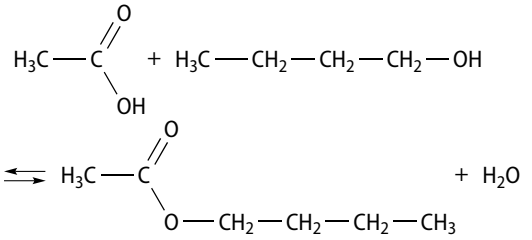




A est de l'eau H_2O.

b. Les ions H^+ sont consommés dans l'étape ❶ et régénérés dans l'étape ❺, c'est un catalyseur. Les ions H^+ sont apportés par l'acide sulfurique.

4. En faisant le bilan du mécanisme réactionnel, on trouve l'équation de la réaction de synthèse de l'éthanoate de butyle :



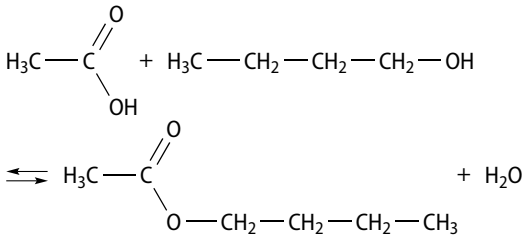
5. a. La vitesse volumique d'apparition de l'éthanoate de butyle est la dérivée temporelle de sa concentration en quantité de matière. On peut l'écrire :

$$v_{\text{éthanoate de butyle}} = \frac{\mathrm{d}\left[\text{éthanoate de butyle}\right]}{\mathrm{d}t}.$$

b. Une réaction est d'ordre 1 par rapport à un réactif A si la vitesse de formation de chaque produit (ou la vitesse d'apparition du réactif A) est proportionnelle à la concentration du réactif A. D'après les graphiques du document 4**,** pour aucune des expériences menées la vitesse de formation de l'éthanoate de butyle en fonction de la concentration en $H_3C{-}CO_2H$ ne peut être modélisée par une droite passant par l'origine du repère. La vitesse de formation de l'éthanoate de butyle n'est donc pas proportionnelle à la concentration en acide éthanoïque. Cette réaction n'est donc pas d'ordre 1 par rapport à l'acide éthanoïque.

› Synthèse

L'éthanoate de butyle est synthétisé à partir d'acide éthanoïque et de butan-1-ol selon la réaction d'équation :

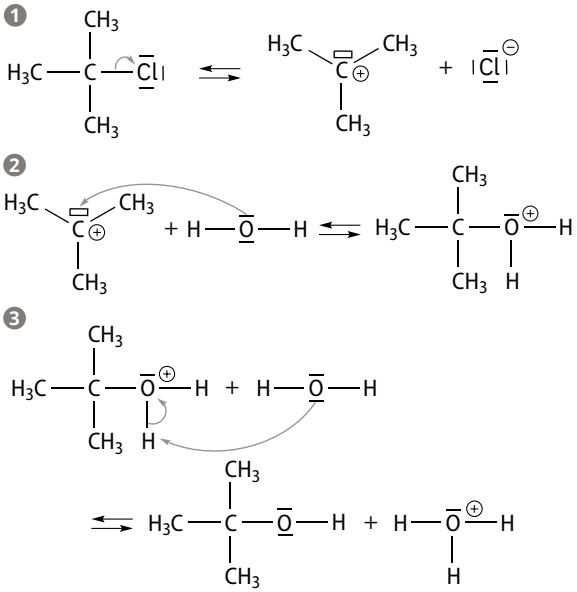


Cette réaction lente peut être catalysée par un acide, et accélérée par une augmentation de la température du milieu réactionnel. Elle se déroule suivant un mécanisme réactionnel en cinq étapes au cours desquelles l'ion H^+ est consommé puis régénéré.

Les graphes représentant la vitesse d'apparition de l'éthanoate de butyle en fonction de la concentration en acide éthanoïque ne peuvent pas être modélisés par des droites passant par l'origine. Cette réaction n'est donc pas d'ordre 1 par rapport à l'acide éthanoïque.

38 › Questions préliminaires

1.

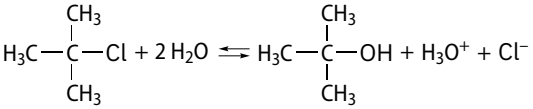


Dans l'étape ❶, le doublet d'électrons entre C et Cl est attiré par le chlore plus électronégatif.

Dans l'étape ❷, le doublet non liant de l'oxygène est un site donneur de doublet d'électrons et le carbone chargé positivement est un site accepteur de doublet d'électrons. La flèche courbe part du site donneur et pointe vers le site accepteur de doublet d'électrons.

Dans l'étape ❸, le doublet non liant de l'oxygène de la molécule d'eau est un site donneur de doublet d'électrons et l'hydrogène lié à l'oxygène chargé positivement est un site accepteur de doublet d'électrons, car moins électronégatif que l'oxygène auquel il est lié. La flèche courbe part du site donneur et pointe vers le site accepteur. Le doublet qui lie l'oxygène chargé positivement à l'hydrogène passe entièrement sur l'oxygène et devient un doublet non liant.

2.



› Le problème à résoudre

• *Relation entre la conductivité de la solution et la concentration du 2-chloro-2-méthylpropane*

Pour simplifier les notations, le 2-chloro-2-méthylpropane sera noté ^{t}Bu-Cl d'après un autre de ses noms, le chlorure de tertio-butyle. Dans le mélange réactionnel, on a :

$\sigma = \sigma_{solution} = \lambda_{H_3O^+} \cdot [H_3O^+] + \lambda_{Cl^-} \cdot [Cl^-]$

Un tableau d'avancement peut montrer qu'à chaque instant :

$[H_3O^+] = [Cl^-] = [^t\text{Bu-Cl}]_0 - [^t\text{Bu-Cl}]$

Ainsi, la conductivité de la solution peut s'exprimer de la manière suivante :

$\sigma = (\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot [H_3O^+]$

$= (\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot ([^t\text{Bu-Cl}]_0 - [^t\text{Bu-Cl}])$

On peut donc calculer la concentration en 2-chloro-2-méthylpropane aux différents instants à partir de la valeur de la conductivité :

$$[^t\text{Bu-Cl}] = [^t\text{Bu-Cl}]_0 - \frac{\sigma}{\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}}.$$

• *Calcul de la concentration initiale en 2-chloro-2-méthylpropane*

Dans la solution S, la quantité de matière de 2-chloro-2-méthylpropane vaut :

$$n_S(^t\text{Bu-Cl}) = \frac{m(^t\text{Bu-Cl})}{M(^t\text{Bu-Cl})} = \frac{\rho(^t\text{Bu-Cl}) \cdot V(^t\text{Bu-Cl})}{M(^t\text{Bu-Cl})}$$

On prélève 5,0 mL de S pour les introduire dans le milieu réactionnel. La mélange réactionnel contient donc :

$$n_0(^t\text{Bu-Cl}) = \frac{5,0}{25,0} \times n_S(^t\text{Bu-Cl})$$

Ainsi, $n_0(^t\text{Bu-Cl}) = \frac{5,0}{25,0} \times \frac{\rho(^t\text{Bu} - \text{Cl}) \cdot V(^t\text{Bu-Cl})}{M(^t\text{Bu-Cl})}$.

Donc : $[^t\text{Bu-Cl}]_0 = \frac{n_0(^t\text{Bu-Cl})}{V_{mélange}}$

$$= \frac{5,0}{25,0} \times \frac{\rho(^t\text{Bu-Cl}) \cdot V(^t\text{Bu-Cl})}{M(^t\text{Bu-Cl}) \cdot V_{mélange}}$$

$$= \frac{5,0}{25,0} \times \frac{0,85 \times 1,0}{92,0 \times (200,0 \times 10^{-3} + 5,0 \times 10^{-3})}$$

$= 9,0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$

• *Calcul de la concentration en 2-chloro-2-méthylpropane à chaque instant*

On en déduit la valeur de la concentration en 2-chloro-2-méthylpropane à chaque instant par la relation :

$$[^t\text{Bu-Cl}] = [^t\text{Bu-Cl}]_0 - \frac{\sigma}{\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}}$$

À l'aide d'un tableur, ou d'un langage de programmation, on trouve les valeurs suivantes :

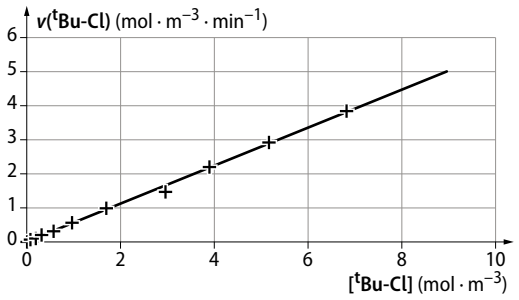
t (en min)	$[^t\text{Bu-Cl}]$ (en mol · m^{-3})
0	9,013786
0,5	6,819465418
1	5,16492423
1,5	3,897616087
2	2,958869314
3	1,69156117
4	0,964032421
5	0,565065042
6	0,30690968
7	0,189566333
8	0,095691656
9	0,048754317
10	0,025285648
11	0,025285648
12	0,001816979
13	0,001816979
14	0,001816979
15	0,001816979

• *Calcul de la vitesse de disparition du 2-chloro-2-méthylpropane à chaque instant*

On calcule ensuite la vitesse de disparition du 2-chloro-2-méthylpropane par la relation :

$$v(^t\text{Bu-Cl})_i = -\frac{\left[{}^t\text{Bu} - \text{Cl}\right]_{i+1} - \left[{}^t\text{Bu} - \text{Cl}\right]_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

• *Tracé du graphe de la vitesse de disparition du 2-chloro-2-méthylpropane en fonction de sa concentration :*



• *Modélisation des points expérimentaux par une droite passant par l'origine du repère*

Les points expérimentaux peuvent bien être modélisés par une droite passant par l'origine (voir ci-dessus).

La vitesse de disparition du 2-chloro-2-méthylpropane est proportionnelle à sa concentration, la réaction d'hydrolyse du 2-chloro-2-méthylpropane est donc d'ordre 1 par rapport au 2-chloro-2-méthylpropane.

39 › Analyse

1. Le réactif et le produit sont des gaz, on peut donc suivre cette transformation par manométrie.

2. a. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final.

b. Plus le temps de demi-réaction est faible, plus la durée de la transformation est faible. Donc la durée d'une transformation et le temps de demi-réaction évoluent dans le même sens.

› Synthèse

Le graphique du document 2 montre que le temps de demi-réaction diminue lorsque la concentration initiale en butadiène augmente. Ainsi, la transformation est d'autant plus rapide que la concentration en butadiène est élevée.

Le facteur cinétique mis en évidence est la concentration en réactif. En effet, plus la concentration initiale en réactif est élevée, plus le temps de demi-réaction est faible, donc plus la transformation est rapide.

Au niveau microscopique, une augmentation de la concentration en réactifs induit une augmentation de la fréquence des chocs efficaces entre les réactifs, donc une augmentation de la vitesse de la transformation, ou une diminution de sa durée.

40 1. La vitesse volumique de disparition de A s'écrit : $v_A = -\dfrac{d[A]}{dt}$.

La réaction étant d'ordre 1, la vitesse de disparition de A s'exprime aussi : $v_A = k \cdot [A]$, avec k une constante de proportionnalité en $mol \cdot L^{-1} \cdot s^{-1}$.

2. On peut égaliser les deux expressions de la vitesse volumique de disparition de A. On obtient donc : $-\dfrac{d[A]}{dt} = k \cdot [A]$.

3. Pour résoudre cette équation différentielle en [A], on procède à une séparation des variables : on fait passer toutes les variables en [A] dans le membre de gauche de l'égalité, et la variable temporelle dans le membre de droite. On obtient : $\dfrac{d[A]}{[A]} = -k \cdot dt$.

En intégrant cette équation, on peut écrire : $\ln\dfrac{[A]}{[C]} = -k \cdot t$, avec [C] une constante d'intégration homogène à une concentration en quantité de matière.

On a donc : $[A] = [C] \cdot e^{-k \cdot t}$.

Or, à $t = 0$, $[A](t = 0) = [A]_0$, donc $[C] = [A]_0$.

On a donc : $[A] = [A]_0 \cdot e^{-k \cdot t}$.

4. a. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final. Cette réaction étant totale, c'est aussi la durée au bout de laquelle la concentration en A vaut la moitié de la concentration initiale en A.

Donc $[A](t_{1/2}) = \dfrac{[A]_0}{2}$.

Ainsi, $\dfrac{[A]_0}{2} = [A]_0 \cdot e^{-k \cdot t_{1/2}}$. On trouve alors $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{k}$.

b. On constate que le temps de demi-réaction est indépendant de la concentration initiale en A. On peut donc déterminer le temps de demi-réaction pour différentes concentrations initiales en A. Si la valeur de $t_{1/2}$ ne varie pas, alors on peut dire que la réaction est d'ordre 1.

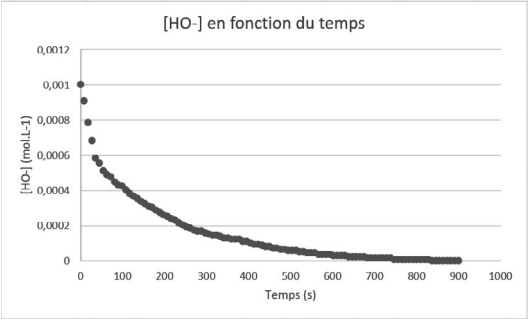
POUR PRÉPARER L'ECE *p. 110*

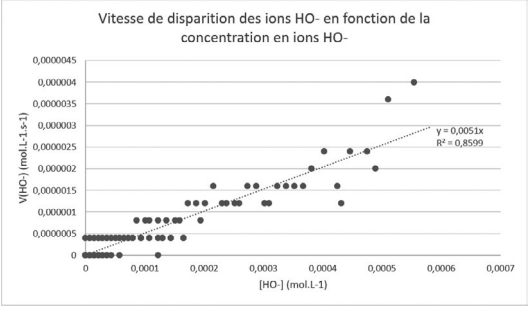
1. Proposition de protocole expérimental

Dans un premier temps, il faut préparer la solution d'hydroxyde de sodium de concentration $1{,}0 \times 10^{-3}$ $mol \cdot L^{-1}$. On dispose d'une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $1{,}0 \times 10^{-2}$ $mol \cdot L^{-1}$. Il faut donc préparer 200 mL de cette solution diluée 10 fois. Pour cela, on prélève 20 mL de la solution disponible à l'aide d'une pipette jaugée, que l'on verse dans une fiole jaugée de 200 mL. L'utilisation d'une éprouvette graduée de 20 mL et de 200 mL donnerait une dilution moins précise.

On verse ces 200 mL d'hydroxyde de sodium préparés dans un grand bécher muni d'un turbulent, d'une sonde conductimétrique et posé sur un agitateur magnétique. On y ajoute 1 mL d'éthanoate d'éthyle prélevé avec une pipette jaugée (ici, l'éthanoate d'éthyle étant en excès, une pipette compte-goutte, sans plus de précision, suffira), et on relève la conductivité de la solution pendant quinze minutes. En effet, le temps de demi-réaction valant environ 2 minutes, on doit attendre 6 à 7 fois le temps de demi-réaction pour la réaction soit terminée.
À l'aide d'un logiciel de programmation (ou d'un tableur-grapheur), après avoir entré les valeurs de conductivité initiales et tout au long de la transformation, on calcule la concentration en ions hydroxyde, la vitesse volumique de disparition des ions hydroxyde et on trace le graphe représentant la vitesse volumique de disparition des ions hydroxyde en fonction de la concentration en ions hydroxyde. Si ce graphe peut être modélisé par une droite passant par l'origine, la réaction étudiée est bien d'ordre 1 par rapport aux ions hydroxyde.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental
En réalisant le protocole ci-dessus, on obtient les graphes suivants :





Remarque : quand on verse l'éthanoate d'éthyle dans le bécher, la solution prend un peu de temps à s'homogénéiser. Les mesures du début de la transformation peuvent fausser l'exploitation des résultats.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. On calcule la quantité de matière initiale en ions hydroxyde :
$n_0(HO^-) = c_0 \cdot V = 1{,}0 \times 10^{-3} \times 200 \times 10^{-3} = 2{,}0 \times 10^{-4}$ mol.
On calcule ensuite la quantité de matière initiale en éthanoate d'éthyle, noté « eth » :

$$n_0(\text{eth}) = \frac{m(\text{eth})}{M(\text{eth})} = \frac{\rho(\text{eth}) \cdot V(\text{eth})}{M(\text{eth})}$$

$$= \frac{d(\text{eth}) \cdot \rho(\text{eau}) \cdot V(\text{eth})}{M(\text{eth})}$$

$$= \frac{0{,}90 \times 1{,}0 \times 1{,}0}{88}$$

$$= 1{,}0 \times 10^{-2} \text{ mol} >> n_0(HO^-)$$

Les coefficients stœchiométriques pour l'éthanoate d'éthyle et pour les ions hydroxyde étant égaux, on vérifie bien que l'éthanoate d'éthyle est en excès.

2. Le graphe représentant la vitesse volumique de disparition des ions hydroxyde en fonction de leur concentration peut bien être modélisé par une droite passant par l'origine. Le mélange réalisé est bien le siège d'une transformation d'ordre 1.

3. Éprouvette graduée :
25 mL ± 0,5 mL et 100 mL ± 1 mL.
Pipette jaugée : 20 mL ± 0,06 mL.
Fiole jaugée : 200 mL ± 0,15 mL.

La pipette jaugée et la fiole jaugée donnent des indications de volume plus précises que les éprouvettes graduées. Pour préparer une solution avec plus de précision, il vaut donc mieux utiliser une pipette jaugée et une fiole jaugée que des éprouvettes graduées.

CHAPITRE 5

Manuel p. 112

Transformations nucléaires

LE PROGRAMME

2. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation

B) Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation nucléaire

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Décroissance radioactive Stabilité et instabilité des noyaux : diagramme (*N, Z*), radioactivité α et β, équation d'une réaction nucléaire, lois de conservation. Radioactivité γ.	Déterminer, à partir d'un diagramme (*N*, *Z*), les isotopes radioactifs d'un élément. Utiliser des données et les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire et identifier le type de radioactivité.
Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs ; constante radioactive ; loi de décroissance radioactive ; temps de demi-vie ; activité.	Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs. Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive. **Capacité mathématique** : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.
Radioactivité naturelle ; applications à la datation. Applications dans le domaine médical ; protection contre les rayonnements ionisants.	Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater un évènement. Citer quelques applications de la radioactivité dans le domaine médical. Citer des méthodes de protection contre les rayonnements ionisants et des facteurs d'influence de ces protections.

Conformément au BO spécial n° 2 du 13 février 2020, les notions étudiées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite du baccalauréat à la date de publication du manuel.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 112

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves connaissent la notion d'isotopie et l'écriture symbolique d'un noyau, rencontrées en classe de 2de.

› Exemple de réponse attendue

Ces deux noyaux sont différents par leur nombre de neutrons, donc par leur masse.

L'azote 15 contient un neutron de plus que l'azote 14, soit 8 au lieu de 7.

Les symboles de ces noyaux sont $^{14}_{7}N$ et $^{15}_{7}N$.

› En classe de Terminale

La notion d'isotopie sera réinvestie dans ce chapitre, par exemple pour déterminer les isotopes radioactifs à partir d'un diagramme (*N, Z*) (**activité 1**).

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier les connaissances abordées en enseignement scientifique de la classe de 1re, à savoir que les lois régissant la radioactivité sont statistiques (elles sont élaborées sur un grand nombre d'échantillons d'un noyau donné) et donc que l'avenir d'un noyau radioactif ne se prédit qu'en termes de probabilités.

› Exemple de réponse attendue

Un noyau radioactif ne change pas jusqu'au moment où il se désintègre. L'instant d'avant, il est tel qu'il a toujours été, l'instant d'après, il n'existe plus. On dit qu'il ne « vieillit » pas. Il est impossible de prédire l'évolution d'un noyau.

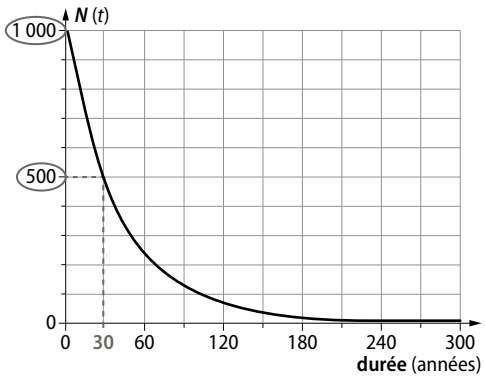
› En classe de Terminale

Les élèves auront l'occasion d'identifier les différents types de radioactivité et d'écrire des équations de réaction de désintégration dans les **activités 1** et **2**.

SITUATION 3

Il s'agit ici de revoir la notion de temps de demi-vie, également rencontrée en enseignement scientifique de 1re.

› Exemple de réponse attendue



À l'instant initial, il y a N_0 = 1 000 noyaux dans l'échantillon radioactif.
Lorsqu'il n'en restera plus que la moitié, soit $\frac{N_0}{2} = 500$ noyaux, il se sera écoulé une demi-vie, soit une durée $t = 30$ années.

› En classe de Terminale

Il s'agit de passer de l'étude limitée au cas de durées discrètes (multiples entiers du temps de demi-vie) à une loi d'évolution d'une population de noyaux régie par une équation différentielle linéaire du premier ordre. Les **activités 3** et **4** donneront une idée des différentes applications de cette loi.

ACTIVITÉS

p. 114 ACTIVITÉ 1

Diagramme de stabilité des noyaux

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet d'interpréter le diagramme (N, Z) afin de distinguer les noyaux stables de ceux qui ne le sont pas.

› Exploitation et analyse

1. a. Jusqu'à $Z = 20$, les noyaux stables ont autant de neutrons que de protons soit $N = Z$ (par exemple $^{40}_{20}Ca$).
b. Au-delà, on a $N > Z$.

2. a. En examinant le diagramme jusqu'à $Z = 20$, partie pour laquelle $N = Z$ pour les noyaux stables, on voit que la zone rose est en dessous de la zone bleue, donc des désintégrations β^+ se produisent s'il y a un excès de protons par rapport aux neutrons. La zone rouge est au-dessus de la zone bleue, donc des désintégrations β^- se produisent s'il y a un excès de neutrons par rapport aux protons.

b. Pour les désintégrations β^+ : $\frac{N}{Z} < 1$.

Pour les désintégrations β^- : $\frac{N}{Z} > 1$.

3. Il va y avoir des désintégrations α pour les noyaux lourds avec un excès de protons (à partir de $Z = 84$; peu d'émission α si $Z < 60$).

› Synthèse

4. La vallée de la stabilité est en bleu, et les zones en rouge, vert et rose représentent la mer d'instabilité.

p. 115 ACTIVITÉ 2

Différents types de radioactivité

Commentaires pédagogiques

Dans cette activité, les élèves devront modéliser les transformations spontanées de noyaux instables lors de désintégrations radioactives en écrivant les équations.

› Exploitation et analyse

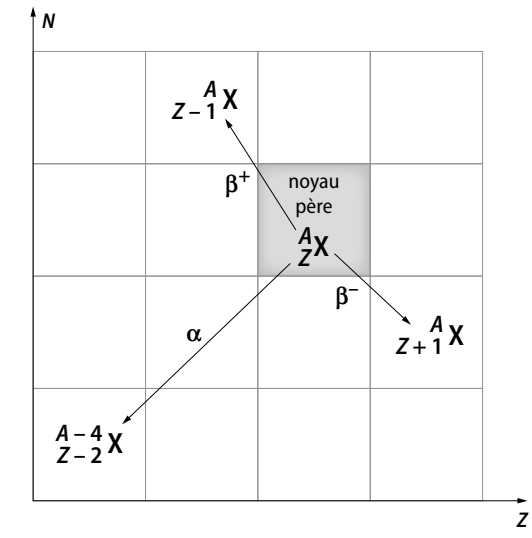
1. $^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$
$^{18}_{9}F \rightarrow {}^{18}_{8}O + {}^{0}_{1}e$
$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$

2. $^{18}_{9}F \rightarrow {}^{18}_{8}O^* + {}^{0}_{1}e$
$^{18}_{8}O^* \rightarrow {}^{18}_{8}O + \gamma$
$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N^* + {}^{0}_{-1}e$
$^{14}_{7}N^* \rightarrow {}^{14}_{7}N + \gamma$

3. La radioactivité α revient à l'expulsion de 2 protons et de 2 neutrons.
La radioactivité β^- revient à la transformation d'un neutron en proton.
La radioactivité β^+ revient à la transformation d'un proton en neutron.

› Synthèse

4.



p. 116 ACTIVITÉ 3

Datation au carbone 14

Commentaires pédagogiques

Dans cette activité, les élèves découvriront comment la loi d'évolution d'une population de noyaux débouche sur une méthode permettant d'estimer l'âge d'une œuvre d'art.

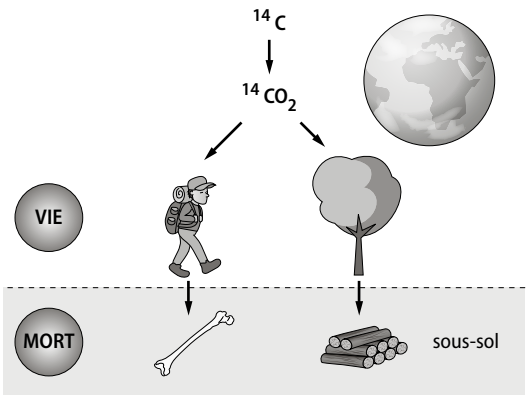
› Exploitation et analyse

1. a. Il s'agit d'objets d'origine organique.
b. Du carbone d'origine organique (CO_2) a été piégé lors de la fabrication du pigment minéral.

2. a. Les faussaires peuvent très bien avoir réutilisé de vieux cadres ou toiles pour leurs contrefaçons.
b. C'est une méthode invasive : elle nécessite de perdre un peu de pigment, un paramètre critique pour des œuvres précieuses.
c. Les scientifiques travaillent actuellement à diminuer la taille de l'échantillon prélevé.

› Synthèse

3.



p. 117 ACTIVITÉ 4

Applications en médecine

Commentaires pédagogiques

Cette dernière activité est l'occasion de découvrir des applications de la radioactivité dans le domaine médical. En particulier, les élèves verront comment la médecine utilise des éléments radioactifs pour établir un diagnostic. Il est nécessaire de visionner la vidéo « La scintigraphie » pour répondre aux questions de l'activité.

› Exploitation et analyse

1. a. L'imagerie fonctionnelle permet d'observer l'activité d'un organe alors que l'imagerie anatomique montre seulement les contours et la densité de l'organe étudié.
b. La scintigraphie ou la TEP sont des imageries fonctionnelles alors que la radiologie ou le scanner sont des imageries anatomiques.

2. En scintigraphie, on exploite la radioactivité γ de la source alors qu'en TEP, c'est sa radioactivité β^+ qui est initialement mise en jeu.

3. a. Les éléments radioactifs doivent être transportés et stockés dans des conteneurs en plomb, manipulés dans une enceinte plombée. Avant d'être injecté au patient, le traceur radioactif est placé dans une seringue logée dans un protège seringue en tungstène.
b. L'utilisation d'éléments radioactifs à très faible dose n'a pas montré d'effets indésirables, mais par mesure de précaution, l'examen n'est pas pratiqué chez les femmes enceintes ou en période d'allaitement.

› Synthèse

4. Elles permettent de visualiser le fonctionnement des organes de façon simple et peu invasive. Ainsi, on peut détecter des anomalies, par exemple des zones du cerveau qui ne fonctionnent plus, quand une IRM ou un scanner montreront des structures normales.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel p. 122

1 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le diagramme (*N*, *Z*) porte en ordonnée le nombre de neutrons.
La proposition C est une bonne réponse.

2 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la radioactivité peut aussi concerner des noyaux légers.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car on peut fabriquer des radioéléments artificiels.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la radioactivité est un phénomène spontané.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la particule éjectée serait un noyau d'hélium ^4_2He.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la particule éjectée serait un électron $^0_{-1}e$.

5 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car une désintégration α peut éliminer 4 nucléons.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car une désintégration α peut éliminer 4 nucléons.

6 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la température n'influe pas sur l'activité.
La proposition C est une bonne réponse.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la loi d'évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs est une courbe décroissante.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$.

9 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'appareil qui mesure la radioactivité est un compteur Geiger-Müller.

10 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car c'est le carbone 14 qui peut être utilisé pour une datation.

11 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, pour une chimiothérapie, on utilise des médicaments.
La proposition C est une bonne réponse.

12 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car les rayonnements γ sont très énergétiques, donc très pénétrants.

13 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car on se protège mieux avec un écran épais.
La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases *p. 123*

› 1. Stabilité et instabilité des noyaux

14 **1.** La radioactivité est la transformation d'un noyau instable en un noyau plus stable qui s'accompagne de l'émission d'une particule chargée.

2. a. Ils sont classés par nombre de neutrons (*N*) et nombre de protons (*Z*).
b. Au-dessus de la zone bleue (zone rouge), il y a excès de neutrons par rapport aux protons (radioactivité β^-).
En dessous de la zone bleue (zone rose), il y a excès de protons par rapport aux neutrons (radioactivité β^+).
La zone verte signale un excès de protons et de neutrons (radioactivité α).
c. Les noyaux stables y sont regroupés. L'évolution des noyaux instables, vers cette vallée, illustre les différents types de radioactivité.

15 **1.** Les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire sont la conservation de la charge électrique et la conservation du nombre de nucléons.

2. a. $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^{4}_{2}\text{He}$
Oui, ces deux lois sont respectées car :
$84 = 82 + 2$ et $210 = 206 + 4$.

b. $^{7}_{4}\text{Be} + {}^{1}_{1}\text{H} \rightarrow 2\ {}^{4}_{2}\text{He}$
Non, ces deux lois ne sont pas respectées car :
$4 + 1 = 5 \neq 2 \times 2 = 4$.

c. $^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{139}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{1}_{0}\text{n}$
Non, ces deux lois ne sont pas respectées car :
$235 + 1 = 236 \neq 139 + 94 + 1 = 234$.

d. $^{4}_{2}\text{He} + {}^{9}_{4}\text{Be} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C}$
Non, ces deux lois ne sont pas respectées car :
$4 + 9 = 13 \neq 12$.

16 **1.** Le nombre de nucléons de la particule émise doit être nul car l'argon 40 et le calcium 40 ont le même nombre de nucléons que le potassium 40 et car le nombre de nucléons se conserve lors d'une réaction nucléaire.

2. Équation de la réaction nucléaire produisant le calcium 40 ($^{40}_{20}\text{Ca}$) : $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + {}^{0}_{-1}\text{e}$.

Équation de la réaction nucléaire produisant l'argon 40 ($^{40}_{18}\text{Ar}$) : $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + {}^{0}_{1}\text{e}$.

17 **1.** Les deux lois de conservation permettant d'écrire l'équation d'une réaction nucléaire sont :
– la conservation de la charge électrique ;
– la conservation du nombre de nucléons.

2. a. et **b.** La radioactivité β^- s'accompagne de l'émission d'un électron de symbole : $^{0}_{-1}\text{e}$.

La radioactivité β^+ s'accompagne de l'émission d'un positon de symbole : ${}^{0}_{1}e$.

3. Pour le noyau d'argent 108, une désintégration β^- s'écrit : ${}^{108}_{47}Ag \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{-1}e$
En appliquant les lois de conservation, on a :
• $108 = A + 0$ donc $A = 108$;
• $47 = Z - 1$ donc $Z = 48$.
Donc X est l'élément cadmium Cd :
${}^{108}_{47}Ag \rightarrow {}^{108}_{48}Cd + {}^{0}_{-1}e$
Pour le noyau d'argent 108, une désintégration β^+ s'écrit : ${}^{108}_{47}Ag \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + {}^{0}_{1}e$
En appliquant les lois de conservation, on a :
• $108 = A + 0$ donc $A = 108$;
• $47 = Z + 1$ donc $Z = 46$.
Donc Y est l'élément palladium Pd :
${}^{108}_{47}Ag \rightarrow {}^{108}_{46}Pd + {}^{0}_{1}e$

18 **1.** La zone grisée dans le diagramme (N, Z) est la « vallée de la stabilité ». Elle correspond à la zone dans laquelle les noyaux sont stables : ils ne se désintègrent pas.

2. a. En appliquant les lois de conservation sur le nombre de nucléons (A) et le numéro atomique (Z) lors d'une réaction nucléaire, on a :
${}^{148}_{62}Sm \rightarrow {}^{144}_{60}Nd + {}^{A}_{Z}X$
La conservation du nombre de nucléons A implique : $148 = 144 + A$, donc $A = 4$.
La conservation de la charge électrique Z implique : $62 = 60 + Z$, donc $Z = 2$.
Soit : ${}^{148}_{62}Sm \rightarrow {}^{144}_{60}Nd + {}^{4}_{2}He$

b. La particule émise est un noyau d'hélium : il s'agit donc d'une radioactivité de type α.

c. Ce seront des noyaux lourds avec un excès de protons, situés au-dessus de $Z = 80$.

3. Lors d'une désintégration β^-, le noyau fils doit avoir un numéro atomique qui augmente d'une unité par rapport au noyau père et un nombre de nucléons qui reste stable. Il est donc possible de former *a priori* ${}^{145}_{61}Pm$ à partir de ${}^{145}_{60}Nd$.

› 2. Décroissance radioactive

19 **1.** Dans 200 g d'os, il se produit une quinzaine de désintégrations par minute, soit $\frac{15}{60} = 0{,}25$ désintégration par seconde, ou 0,25 Bq.

2. a. $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t)$.

Soit $\frac{dN(t)}{dt} + \lambda \cdot N(t) = 0$.

b. $\frac{dN(t)}{dt} + \lambda \cdot N(t) = N_0 \cdot (-\lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot t} + \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$
$= 0$

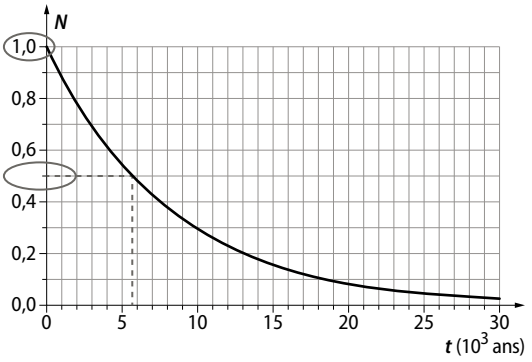
L'expression de $N(t)$ donnée est bien solution de l'équation différentielle.

3. $N(t) = \frac{A(t)}{\lambda}$

$N(t) = \frac{0{,}25}{3{,}93 \times 10^{-12}} = 6{,}36 \times 10^{10}$ noyaux

20 **1.** Pour établir l'équation correspondant à la représentation graphique fournie, on écrit :
$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$: c'est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants du type $y' = a \cdot y$. Sa résolution donne $y(x) = k \cdot e^{a \cdot x}$.
On en déduit que $N(t) = k \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
Comme à $t = 0$ s, $N(0) = N_0$ alors :
$k = N_0$ et $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

2. a. Le temps de demi-vie est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon se sont désintégrés.
b. À l'instant initial, il y a N_0 noyaux dans l'échantillon radioactif (ici, $N_0 = 1{,}0$).
Lorsqu'il n'en restera plus que la moitié, soit $\frac{N_0}{2}$ noyaux, il se sera écoulé une demi-vie, soit $t_{1/2}$ ans.
En appliquant la définition de temps de demi-vie et en utilisant les données, on déduit :
$t_{1/2} = 5{,}7 \times 10^3$ ans



c. Il s'agit du carbone 14.

3. a. D'après la définition de la réponse **1**, on a : $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$,

donc : $\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$

$\ln \frac{1}{2} = \ln (e^{-\lambda \cdot t_{1/2}})$

$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2}$

$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

La relation entre le temps de demi-vie et la constante radioactive est : $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$.

b. La constante radioactive s'écrit : $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}$, et s'exprime en s^{-1}.

AN : $\lambda = \dfrac{\ln 2}{5{,}7 \times 10^3 \times 3\,600 \times 24 \times 365{,}25}$

soit $\lambda = 3{,}9 \times 10^{-12}\ s^{-1}$.

21 **1.** On a $\dfrac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \cdot N(t)$ et, en faisant tendre Δt vers 0, on obtient :

$\dfrac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$

C'est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants du type $y' = a \cdot y$ dont la résolution donne $y(x) = k \cdot e^{a \cdot x}$.

On en déduit que $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ car, à $t = 0$ s, $N = k = N_0$, avec λ exprimé en s^{-1} et t en s.

2. Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ correspond à la durée au bout de laquelle la population d'un échantillon de noyaux radioactifs a été divisée par deux.

3. $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$.

Soit $\dfrac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$

D'où $\ln \dfrac{1}{2} = \ln (e^{-\lambda \cdot t_{1/2}})$

$-\ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2}$

$t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$

On a donc : $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}$

$\dim \lambda = \dim \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}} = \dfrac{1}{T} = T^{-1}$

λ est homogène à l'inverse d'un temps et s'exprime alors en s^{-1}.

4. a. L'activité à l'instant t d'un échantillon $A(t)$ est le nombre de désintégrations par seconde.

b. Son unité est le becquerel (Bq). 1 Bq correspond à 1 désintégration par seconde.

c. On la mesure à l'aide d'un compteur de radioactivité, ou compteur Geiger-Müller.

5. $A(t)$ est définie par la relation : $A(t) = -\dfrac{dN(t)}{dt}$.

$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

D'où $A(t) = -(-\lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$
$= \lambda \cdot N(t)$.

› 3. Applications de la radioactivité

22 **1.** Les traceurs radioactifs sont des émetteurs de rayonnements γ.

2. Les traceurs utilisés en scintigraphie ont une activité qui décroît rapidement.

3. La radioactivité α est accompagnée de l'émission d'un noyau d'hélium ${}^4_2He$ qui a une masse beaucoup plus grande que celle d'un électron (β^-) ou d'un positon (β^+) accompagnant la radioactivité β.

4. Les deux traceurs possèdent une même activité initiale, ils seront détectés avec la même intensité par la gamma caméra, mais l'iode 131 possède, après 400 jours, une activité beaucoup plus faible que le traceur de demi-vie 80 jours. L'iode 131 est donc moins nocif pour la santé.

5. Des précautions doivent être prises par le personnel pour se protéger des rayonnements, nocifs pour la santé. Les éléments radioactifs doivent être transportés et stockés dans des conteneurs en plomb et manipulés dans une enceinte plombée. Avant d'être injecté au patient, le traceur est placé dans une seringue logée dans un protège seringue en tungstène.

23 **1.** Contrairement à un végétal vivant, le bois mort ne renouvelle plus son carbone 14, donc son activité diminue au cours du temps. Elle est plus faible que celle d'un bois vivant.

2. a. $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

$e^{-\lambda \cdot t} = \dfrac{A(t)}{A_0}$

$-\lambda \cdot t = \ln \dfrac{A(t)}{A_0}$

$-\lambda \cdot t = \ln A(t) - \ln A_0$

$\lambda \cdot t = \ln A_0 - \ln A(t)$

$t = \dfrac{1}{\lambda} \cdot \ln \dfrac{A_0}{A(t)}$

AN : $t = \dfrac{1}{1{,}22 \times 10^{-4}} \times \ln \dfrac{13{,}6}{12{,}0}$ soit $t = 1{,}03 \times 10^3$ ans.

b. 1983 – 1030 = 953. L'année de construction du bateau est 953.

24 **1.** Les rayonnements les plus pénétrants sont les rayonnements gamma.

2. Les rayonnements α sont facilement absorbés par les matériaux et les tissus humains car ce sont des noyaux d'hélium (2 protons et 2 neutrons), particules lourdes par rapport à celles émises lors des rayonnements β (électron ou positon).

Faire le point avant d'aller plus loin p. 125

◗ ***Citer les lois de conservation vérifiées dans l'équation d'une réaction nucléaire.***

Les deux lois de conservation qui permettent d'écrire l'équation d'une réaction nucléaire sont :

– la conservation de la charge électrique ;
– la conservation du nombre de nucléons.

◗ ***Expliciter les différents types de radioactivité en précisant les particules ou les rayonnements mis en jeu.***

Un noyau lourd contenant trop de nucléons peut subir une désintégration α en libérant un noyau d'hélium.

Un noyau qui possède un excès de neutrons par rapport aux protons peut subir une désintégration β^- en libérant un électron.

Un noyau qui possède un excès de protons par rapport aux neutrons peut subir une désintégration β^+ en libérant un positon.

La plupart du temps, les noyaux issus d'une désintégration β sont dans un état excité, possédant trop d'énergie, phénomène rare lors des désintégrations α.

Les noyaux fils obtenus se désexcitent en émettant une onde électromagnétique de très courte longueur d'onde : c'est la radioactivité gamma.

◗ ***Préciser dans quel cas intervient la radioactivité γ.***

Si lors d'une désintégration, le noyau formé est dans un état excité noté X*, ce noyau se désexcite en émettant un rayonnement γ selon :

$$X^* \rightarrow X + \gamma$$

◗ ***Résoudre l'équation différentielle :***
$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$.

C'est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants du type $y' = a \cdot y$. Sa résolution donne $y(x) = k \cdot e^{a \cdot x}$.

On en déduit que $N(t) = k \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

Comme à $t = 0$ s, $N(0) = N_0$ alors $k = N_0$ et $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

◗ ***Décrire comment obtenir graphiquement le temps de demi-vie à partir de la courbe de décroissance radioactive.***

Le temps de demi-vie, noté $t_{1/2}$, est la durée nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux d'un échantillon radioactif. Sur la courbe $N = f(t)$, on porte sur l'axe des ordonnées la valeur $\frac{N_0}{2}$ et on lit la valeur de $t_{1/2}$ sur l'axe des abscisses.

◗ ***Expliquer le principe de datation à l'aide de noyaux radioactifs.***

La loi de décroissance radioactive permet de dater un échantillon si on connaît le nombre initial N_0 de noyaux radioactifs en mesurant l'activité $A(t)$ de l'échantillon ou le nombre $N(t)$ de noyaux restants à la date t.

◗ ***Citer un moyen de protection contre les rayonnements ionisants.***

Pour se protéger des rayonnements ionisants, il faut blinder la source, s'en éloigner ou mettre en place des écrans dont l'efficacité dépend de la nature et de l'épaisseur du matériau absorbant.

◗ ***Citer des applications de la radioactivité dans le domaine médical.***

Des éléments radioactifs artificiels sont utilisés en radiothérapie et en imagerie médicale.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 126 et 127

26 **1.** Le carbone ^{14}C est un noyau radioactif émetteur β^-, il y a donc libération d'un électron lors de sa désintégration. L'équation de la réaction nucléaire s'écrit :

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$

On trouve le noyau d'azote en appliquant les lois de conservation (conservation de la charge électrique et conservation du nombre de nucléons).

2. L'activité d'un échantillon radioactif correspond au nombre de désintégrations par seconde, elle s'exprime en becquerel (Bq).

3. $A(t) = \lambda \cdot N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ donc :

$$\frac{A_0}{A(t)} = e^{\lambda \cdot t}$$

$$\ln \frac{A_0}{A(t)} = \lambda \cdot t$$

soit : $t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{A_0}{A(t)}$

AN : $t = \frac{1}{1{,}22 \times 10^{-4}} \times \ln \frac{0{,}255}{0{,}223}$

soit $t = 1\,099$ ans $= 1{,}10 \times 10^3$ ans.

4. 1989 – 1099 = 890, le séisme s'est produit environ en l'an 890.

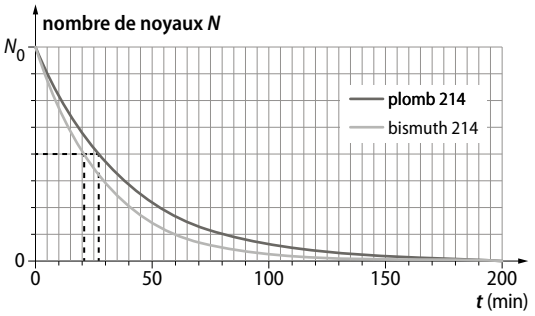
28 **1.** La résolution de l'équation différentielle donne $N(t) = K \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

Comme à $t = 0$ s, $N(0) = N_0$ alors :
$K = N_0$ et $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

2. Le temps de demi-vie d'un échantillon radioactif est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents se sont désintégrés.

3. On détermine graphiquement $t_{1/2}$ pour les deux noyaux.

La demi-vie du plomb 214 est 27 min et celle du bismuth 214 est 20 min.



4. Par définition à $t = t_{1/2}$, on a : $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2}$.

En utilisant la loi de décroissance radioactive, on écrit : $N(t_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = \dfrac{N_0}{2}$.

On en déduit : $-\lambda \cdot t_{1/2} = \ln \dfrac{1}{2}$, soit $-\lambda \cdot t_{1/2} = -\ln 2$ et ainsi $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$.

Comme $t_{1/2\ \text{bismuth 214}} < t_{1/2\ \text{plomb 214}}$
alors $\lambda_{\text{bismuth214}} > \lambda_{\text{plomb214}}$.

S'entraîner pour maîtriser p. 128

29 **1.** L'aluminium a capté les deux protons de l'hélium et a expulsé un neutron selon l'équation :

$$^{27}_{13}\text{Al} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

$27 + 4 = 30 + 1$ et $13 + 2 = 15 + 0$.

2. Non, car cette transformation est provoquée par le bombardement de particules alpha sur l'aluminium.

3. Le phosphore 30 produit est radioactif et comme il n'existe pas dans la nature, on a donc produit un élément radioactif artificiel.

30 **1.** Au cours des réactions nucléaires, il y a conservation du nombre de charges et du nombre de nucléons.

2. L'équation de la réaction nucléaire s'écrit :

$$^{96}_{42}\text{Mo} + {}^{2}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{97}_{43}\text{Tc} + {}^{A}_{Z}\text{X}$$

Il y a conservation du :
– nombre de nucléons : $96 + 2 = 97 + A$, soit $A = 1$;
– nombre de charges : $42 + 1 = 43 + Z$, soit $Z = 0$.
La particule libérée est un neutron, on a :

$$^{96}_{42}\text{Mo} + {}^{2}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{97}_{43}\text{Tc} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

3. L'équation de la désintégration du molybdène 99 s'écrit :

$$^{99}_{42}\text{Mo} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + {}^{0}_{-1}\text{e}$$

Cette désintégration s'accompagne de la libération d'un électron, il s'agit de radioactivité de type β^-.

4. Le temps de demi-vie, c'est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents ont subi une désintégration.

5. a. Deux applications de la médecine nucléaire sont par exemple la radiothérapie qui utilise les rayons alpha ou bêta pour détruire les cellules malignes, et l'imagerie médicale dans laquelle des caméras enregistrent les rayons gamma, donc ces applications nécessitent de disposer d'éléments radioactifs.
b. L'avantage du technétium est que son temps de demi-vie étant court, son utilisation réduit l'irradiation du patient.

31 ***L'affaire Litvinenko***

En 2006, un ancien espion russe, Alexandre Litvinenko, fut empoisonné à Londres par 10 µg de polonium 210, probablement issu de déchets radioactifs. Cet élément, découvert par Marie Curie dans un minerai, la pechblende, a une activité de $1{,}66 \times 10^{14}$ Bq par gramme. Il émet des noyaux d'hélium qui sont très nocifs, car absorbés par les tissus humains.

1. *Le polonium 210, qui a empoisonné Litvinenko, était-il d'origine naturelle ou artificielle ? Qu'en est-il de celui découvert par Marie Curie ?*

2. *Déterminer l'activité des 10 µg de polonium.*

3. *Quel est, en jour, le temps de demi-vie de cet isotope radioactif ?*

1. Il s'agit d'une origine artificielle pour l'empoisonnement de Litvinenko (déchets radioactifs) et d'une origine naturelle pour Marie Curie (pechblende).

2. L'activité du polonium 210 est de $1{,}66 \times 10^{14}$ Bq par gramme.
L'activité A des 10 µg du polonium 210 est donc :
$A = 1{,}66 \times 10^{14} \times 10 \times 10^{-6}$ soit $A = 1{,}66 \times 10^{9}$ Bq.

3. Le temps de demi-vie est $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$.

AN : $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{5{,}8 \times 10^{-8}}$ soit $t_{1/2} = 1{,}2 \times 10^{7}$ s = 138,4 j.

32 **1.** On doit avoir :

$$^{234}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + x\,{}^{4}_{2}\text{He}$$

D'après les lois de conservation : $234 = 222 + 4x$ soit :

$$x = \frac{234 - 222}{4} = 3$$

et $92 = 86 + 2x$ soit :

$$x = \frac{92 - 86}{2} = 3.$$

L'uranium 234 se transforme en radon 222 en 3 désintégrations α.

2. On calcule la moyenne $\overline{n_d}$ et l'écart-type σ de cette série de mesures à la calculatrice.

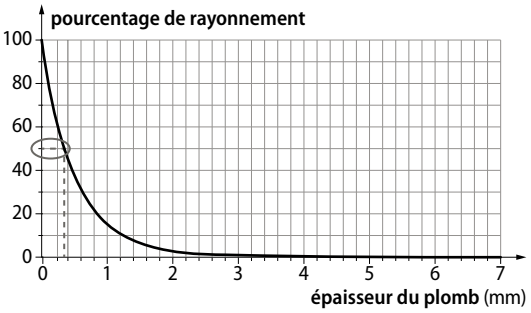
$\overline{n_d} = 8{,}1$. La meilleure estimation de la mesure est donc $\overline{n_d} = 8{,}1$ désintégrations.
On trouve $\sigma = 2{,}99$ désintégrations.
L'incertitude-type est donc :

$$u(\overline{n_d}) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \frac{2{,}99}{\sqrt{20}} = 0{,}7$$

Le nombre de désintégrations est donc $\overline{n_d} = 8{,}1$ désintégrations avec une incertitude-type de 0,7 désintégration.

3. $\overline{A} = k \cdot \overline{n_d}$
$= 80 \times 8{,}1 = 6{,}5 \times 10^2$ Bq · m^{-3}
L'activité volumique moyenne dépasse la norme préconisée par l'Union européenne, qui est de 400 Bq · m^{-3}. On préconisera d'installer une ventilation dans cette pièce.

33 **1.** La valeur de la couche de demi-atténuation du plomb est déterminée graphiquement.
On regarde, pour un pourcentage de 50 %, l'épaisseur de plomb. Elle est d'environ 0,4 mm.



2. L'infirmière ne court aucun risque avec un protège-seringue de 5 mm puisqu'alors la totalité des rayonnements γ est neutralisée.

34 **› Démarche experte**
Le nombre $N(t)$ de noyaux radioactifs de technétium 99 présents dans la dose injectée au patient suit une loi de décroissance exponentielle :
$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
L'activité $A(t)$ d'un échantillon de noyaux radioactifs est définie par $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$ donc :

$$A(t) = -\frac{d(N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t})}{dt} = -N_0 \cdot (-\lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$= N_0 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \text{ avec } A_0 = \lambda \cdot N_0.$$

À la fin de l'examen, on a $A(t) = 0{,}63\ A_0$.
Soit $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = 0{,}63\ A_0$.
$e^{-\lambda \cdot t} = 0{,}63$
$-\lambda \cdot t = \ln 0{,}63$

$$t = -\frac{\ln 0{,}63}{\lambda} = -\frac{\ln 0{,}63}{\ln 2 / t_{1/2}} = -t_{1/2} \cdot \frac{\ln 0{,}63}{\ln 2}$$

$$t = -6{,}0 \times \frac{\ln 0{,}63}{\ln 2} = 4{,}0 \text{ h}$$

Au bout de quatre heures, l'examen est terminé : il est 18 h.

› Démarche avancée
1. L'activité $A(t)$ d'un échantillon de noyaux radioactifs est définie par $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$.
2. $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$. Or le nombre $N(t)$ de noyaux radioactifs de technétium 99 présents dans la dose injectée au patient suit une loi de décroissance exponentielle : $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

$$A(t) = -\frac{d(N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t})}{dt} = -N_0 \cdot (-\lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$= N_0 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \text{ avec } A_0 = \lambda \cdot N_0.$$

3. À la fin de l'examen, on a $A(t) = 0{,}63\ A_0$.
Soit $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = 0{,}63\ A_0$.
$e^{-\lambda \cdot t} = 0{,}63$
$-\lambda \cdot t = \ln 0{,}63$

$$t = -\frac{\ln 0{,}63}{\lambda} = -\frac{\ln 0{,}63}{\ln 2 / t_{1/2}} = -t_{1/2} \cdot \frac{\ln 0{,}63}{\ln 2}$$

$$t = -6{,}0 \times \frac{\ln 0{,}63}{\ln 2} = 4{,}0 \text{ h}$$

Au bout de quatre heures, l'examen est terminé : il est 18 h.

35 **1.** ${}^{15}_{8}O \rightarrow {}^{0}_{1}e + {}^{15}_{7}N$

2. Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ est la durée nécessaire à la désintégration de la moitié de la quantité de noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon.

3. a. La loi de décroissance peut s'écrire :
$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$
Au bout d'une durée égale à $t_{1/2}$, on a $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$
Soit $\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$.
Donc $\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$, soit $\ln \frac{1}{2} = -\lambda \cdot t_{1/2}$.
D'où $-\ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2}$.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

b. $\lambda = \frac{\ln 2}{123} = 5{,}64 \times 10^{-3}$ s^{-1}

4. $N(t_1) = 0{,}05 \times N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_1}$
Soit $e^{-\lambda \cdot t_1} = 0{,}05$
$-\lambda \cdot t_1 = \ln 0{,}05$

$$t_1 = -\frac{\ln 0{,}05}{\lambda} = -\frac{\ln 0{,}05}{5{,}64 \times 10^{-3}}$$

$= 532$ s soit environ 9 min.

5. D'après le calcul précédent, au bout d'une durée $t_1 = 9$ min, le nombre de noyaux restants est de l'ordre de 5 % du nombre de noyaux initialement injectés. Il est alors nécessaire de procéder à une nouvelle injection. Le calcul de t_1 est cohérent avec le texte qui indique que les injections sont espacées de 8 à 10 min.

36 **1.** Au cours d'une transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de charges et du nombre de nucléons.
On obtient ${}^{36}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{36}_{18}\text{Ar} + {}^{0}_{-1}\text{e}$.
Un électron est libéré au cours de cette désintégration, il s'agit de radioactivité de type β^-.

2. Le temps de demi-vie du chlore 36 (environ 300 000 ans) est du même ordre de grandeur que l'âge supposé des eaux (soixante mille à un million d'années).

3. $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}$

$\dim \lambda = \dim \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}} = \dfrac{1}{\text{T}} = \text{T}^{-1}$

λ est homogène à l'inverse d'un temps et s'exprime alors en s^{-1}.

4. $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}} = \dfrac{\ln 2}{3{,}01 \times 10^5 \times 24 \times 3\,600} = 7{,}30 \times 10^{-14}\ \text{s}^{-1}$

5. $N(t) = N_0 \cdot \text{e}^{-\lambda \cdot t}$

6. $N(t) = \dfrac{38}{100} N_0$ donc $\dfrac{N(t)}{N_0} = 0{,}38$

$N(t) = N_0 \cdot \text{e}^{-\frac{(\ln 2) \cdot t}{t_{1/2}}}$

$\text{e}^{-\frac{(\ln 2) \cdot t}{t_{1/2}}} = \dfrac{N(t)}{N_0}$

$-\dfrac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot t = \ln \dfrac{N(t)}{N_0}$

$t = -\ln \dfrac{N(t)}{N_0} \cdot \dfrac{t_{1/2}}{\ln 2}$

AN : $t = -\ln 0{,}38 \times \dfrac{3{,}01 \times 10^5}{\ln 2} = 4{,}2 \times 10^5$ ans

37 **Exemple d'exposé oral**
Les rayonnements issus de la radioactivité sont des **rayonnements ionisants** et leur dangerosité diffère selon leur nature. On peut s'en protéger en intercalant des **écrans** dont l'efficacité dépend, entre autres, de la nature du **matériau absorbant**. S'agissant de la **radioactivité** α, il suffit d'une feuille de papier pour arrêter les particules α.
Une plaque d'aluminium permet de stopper les électrons ou positons émis lors de la **radioactivité** β.
En revanche, un mur en béton est nécessaire pour se protéger de la **radioactivité** γ.

38 **Exemple d'exposé oral**
La loi de décroissance radioactive permet de dater un échantillon si l'on en connaît le nombre de noyaux radioactifs initialement présents N_0. Plusieurs isotopes radioactifs peuvent être utilisés, le plus connu étant le carbone 14. Sa proportion est quasi constante dans les plantes ou le corps humain, en contact avec l'atmosphère. À la mort des organismes, le carbone n'est plus renouvelé : le carbone 14 qu'ils contiennent se désintègre avec un temps de demi-vie de 5 730 ans. Il suffit de mesurer la proportion de carbone 14 dans un échantillon pour connaître l'époque de la mort.

Développer ses compétences *p. 131*

39 **› Questions préliminaires**
1. Pour répondre au problème, on peut utiliser la méthode de datation au carbone 14.

2. ${}^{14}_{7}\text{N} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{14}_{6}\text{C} + {}^{1}_{1}\text{H}$
D'après les lois de conservation, cette particule est formée de 1 nucléon qui porte une charge positive : la particule émise est un proton.

3. ${}^{14}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\text{N} + {}^{0}_{-1}\text{e}$

4. $A(t) = -\dfrac{\text{d}N(t)}{\text{d}t} = \lambda \cdot N(t)$ soit :

$\dfrac{\text{d}N(t)}{\text{d}t} + \lambda \cdot N(t) = 0$

› Le problème à résoudre
L'équation déterminée à la question 4 est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants du type $y' = a \cdot y$ dont la résolution donne $y(x) = \text{A} \cdot \text{e}^{a \cdot x}$. On en déduit que $N(t) = \text{A} \cdot \text{e}^{-\lambda \cdot t}$.
À $t = 0$ s, $N = N_0$ donc $\text{A} = N_0$.
D'où $N(t) = N_0 \cdot \text{e}^{-\lambda \cdot t}$ avec λ exprimé en s^{-1} et t en s.

$\dfrac{N}{N_0} = \text{e}^{-\lambda \cdot t}$

$\ln \dfrac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t$

$t = -\dfrac{\ln \dfrac{N}{N_0}}{\lambda}$

Pour Ander :

$t = -\dfrac{\ln \dfrac{N}{N_0}}{\dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}} = -\ln \dfrac{N}{N_0} \cdot \dfrac{t_{1/2}}{\ln 2}$

$t = -\ln(1{,}64 \times 10^{-2}) \times \dfrac{5\,730}{\ln 2} = 34{,}0 \times 10^3$ ans

L'agence de presse nous donne un intervalle compris entre –60 000 ans et –30 000 ans : le résultat obtenu est bien compatible avec l'article.
Pour Sapiand, on obtient, par un calcul analogue, un âge $t = 32{,}9 \times 10^3$ ans.
Sapiand n'a donc pas pu assasiner Ander (il y a 1 100 ans d'écart).

40 › Questions préliminaires

1. $^{201}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{201}_{81}\text{Tl} + {}^{0}_{1}\text{e}$.

2. Pour le patient C, il s'agit d'un infarctus du myocarde car de nombreuses cellules qui constituent le muscle cardiaque sont détruites. En effet, elles ne fixent pas le thallium (par rapport au patient A, une partie importante de la zone rouge est manquante).
Pour le patient B, il s'agit d'une ischémie coronaire (zone rouge un peu moins importante que pour le patient A, donc la plupart des cellules sont encore vivantes mais elles souffrent du manque d'oxygène dû à une réduction de l'irrigation sanguine).

3. L'activité d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégrations par seconde.

$$A(t) = -\frac{\mathrm{d}N(t)}{\mathrm{d}t}$$

4. $A(t) = -\dfrac{\mathrm{d}N(t)}{\mathrm{d}t}$ avec $N(t) = N_0 \cdot \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t}$ donc :
$A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t}$ et, en posant $\lambda \cdot N_0 = A_0$, il vient :
$A(t) = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t}$

$$N_0 = \frac{A_0}{\lambda}$$

AN : $N_0 = \dfrac{78 \times 10^6}{2{,}6 \times 10^{-6}} = 3{,}0 \times 10^{13}$ noyaux

› Le problème à résoudre

Par un calcul de l'activité A, on va déterminer au bout de combien de jours une nouvelle injection est nécessaire :

$$A(t) = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t}$$

$$\frac{A(t)}{A_0} = \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t}$$

$$\ln \frac{A(t)}{A_0} = -\lambda \cdot t$$

$$\ln \frac{A_0}{A(t)} = \lambda \cdot t$$

$$t = \frac{\ln \dfrac{A_0}{A(t)}}{\lambda}$$

AN : $t = \dfrac{\ln \dfrac{78}{3}}{2{,}6 \times 10^{-6}}$

$= 1{,}25 \times 10^6$ s

= 348 heures soit environ 15 jours.

Si l'examen doit être refait au bout de 8 jours, il n'est pas nécessaire d'injecter à nouveau le traceur radioactif.

41 › Analyse

1. a. L'équation de la réaction de désintégration du radium s'écrit :
$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{A}_{Z}\text{X}$
Il y a conservation du :
– nombre de nucléons :
$226 = 222 + A$, soit $A = 226 - 222 = 4$;
– nombre de charges :
$88 = 86 + Z$, soit $Z = 88 - 86 = 2$.
X est donc un noyau d'hélium $^{4}_{2}\text{He}$, soit une particule α.
Le noyau de radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ se désintègre selon une radioactivité α.

b. Lors de la désintégration du noyau de radium $^{226}_{88}\text{Ra}$, le noyau de radon formé est dans un état excité noté $^{222}_{86}\text{Rn}^*$. Ce noyau se désexcite en émettant un rayonnement γ selon :
$^{222}_{86}\text{Rn}^* \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \gamma$

2. a. L'équation de la réaction de désintégration du phosphore 30 s'écrit :
$^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^{0}_{1}\text{e}$
Lors d'une désintégration β^+, la particule émise est un positon de symbole $^{0}_{1}\text{e}$.

b. Le noyau de silicium 30 étant obtenu directement dans l'état fondamental, donc dans un état non excité, il n'y a pas d'émission de rayonnement lors de la désintégration du phosphore 30.

3. Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié d'une population de noyaux radioactifs est désintégrée.
Pour $t = t_{1/2}$, il reste la moitié des noyaux de radium non désintégrés, l'autre moitié des noyaux s'est désintégrée.
Pour $t = 2t_{1/2}$, il ne reste que $\dfrac{1}{4}$ des noyaux de radium non désintégrés : les $\dfrac{3}{4}$ des noyaux initiaux ont été désintégrés.

AN : $t = 2t_{1/2} = 2 \times 1{,}58 \times 10^3$ soit $t = 3{,}16 \times 10^3$ années.

› Synthèse

La radioactivité naturelle correspond à la désintégration spontanée de noyaux qui existent à l'état naturel (comme le radium 226). La radioactivité artificielle correspond à la désintégration spontanée de noyaux qui n'existent pas à l'état naturel, mais qui ont été synthétisés (comme le phosphore 30).

42 **1.** $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + {}^{0}_{1}\text{e}$

Il s'agit de la désintégration β^+.

2. D'après la loi de décroissance radioactive :
$N_K(t) = N_{K0} \cdot e^{-\lambda \cdot t}$, où λ est la constante radioactive.

3. a. Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif est la durée au bout de laquelle la moitié d'une population de noyaux radioactifs a été désintégrée.

b. D'après la définition précédente :

$N_K(t_{1/2}) = \dfrac{N_{K0}}{2}$

Donc $N_{K0} \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = \dfrac{N_{K0}}{2}$.

Soit $e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = \dfrac{1}{2}$.

Ce qui équivaut à $\lambda \cdot t_{1/2} = \ln 2$.

Finalement : $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}$.

c. $\lambda = \dfrac{\ln 2}{1{,}26 \times 10^9} = 5{,}50 \times 10^{-10}$ an^{-1}.

4. On a la relation : $N_{K0} = N_K(t) + N_{Ar}(t)$.
$N_K(t) = N_{K0} \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ donc :

$e^{-\lambda \cdot t} = \dfrac{N_K(t)}{N_{K0}}$

$e^{\lambda \cdot t} = \dfrac{N_{K0}}{N_K(t)}$

$\ln(e^{\lambda \cdot t}) = \ln \dfrac{N_{K0}}{N_K(t)}$

Soit $t = \dfrac{1}{\lambda} \cdot \ln \dfrac{N_{K0}}{N_K(t)}$.

Or $N_{K0} = N_K(t) + N_{Ar}(t)$ donc $t = \dfrac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\dfrac{N_K(t) + N_{Ar}(t)}{N_K(t)}\right)$

Soit $t = \dfrac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(1 + \dfrac{N_{Ar}(t)}{N_K(t)}\right)$

AN : $t = \dfrac{1}{5{,}50 \times 10^{-10}} \times \ln\left(1 + \dfrac{2{,}3 \times 10^{17}}{2{,}4 \times 10^{16}}\right)$

$= 4{,}3 \times 10^9$ ans.

La roche lunaire est donc âgée de 4,3 milliards d'années.

POUR PRÉPARER L'ECE

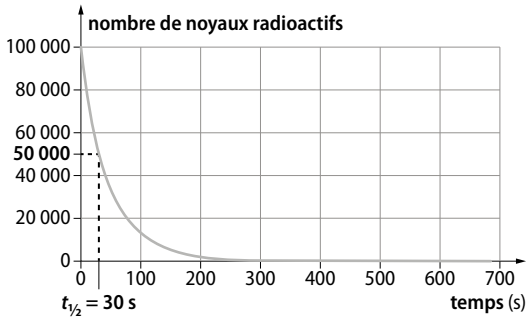
p. 134

1. Proposition de protocole expérimental

Dans les conditions requises de sécurité, on pourrait imaginer le protocole suivant.
On place le compteur Geiger à une distance donnée de la source radioactive. Pour une durée de comptage choisie, celui-ci affiche le nombre *n* de désintégrations. On renouvelle les mesures jusqu'à ce qu'il ne reste plus de noyaux radioactifs en notant *t* et le nombre de noyaux restants à chaque mesure.

2. Mise en œuvre d'une simulation

1. et **2.** Voici la courbe obtenue avec le programme Python :



3. Exploitation du résultat obtenu

1. C'est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants du type $y' = a \cdot y$.
Sa résolution donne $y(x) = k \cdot e^{a \cdot x}$.
On en déduit que $N(t) = k \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
Comme à $t = 0$ s, on a $N(0) = N_0$ alors $k = N_0$ et $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

2. La courbe modélisée obtenue est bien une exponentielle décroissante.

3. On détermine graphiquement $t_{1/2}$ (voir ci-dessus).

4. La principale source d'incertitude est due au fait que la probabilité de désintégration des noyaux est fixée arbitrairement à 1/50 alors que c'est un phénomène purement aléatoire.

CHAPITRE 6

Manuel p. 136

Sens d'évolution spontanée d'un système

LE PROGRAMME

3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique

A) Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
État final d'un système siège d'une transformation non totale : état d'équilibre chimique. Modèle de l'équilibre dynamique.	Relier le caractère non total d'une transformation à la présence, à l'état final du système, de tous les réactifs et de tous les produits. *Mettre en évidence la présence de tous les réactifs dans l'état final d'un système siège d'une transformation non totale, par un nouvel ajout de réactifs.*
Quotient de réaction Q_r. Système à l'équilibre chimique : constante d'équilibre K(T). Critère d'évolution spontanée d'un système hors équilibre chimique.	Déterminer le sens d'évolution spontanée d'un système. Déterminer un taux d'avancement final à partir de données sur la composition de l'état final et le relier au caractère total ou non total de la transformation. *Déterminer la valeur du quotient de réaction à l'état final d'un système, siège d'une transformation non totale, et montrer son indépendance vis-à-vis de la composition initiale du système à une température donnée.*
Transformation spontanée modélisée par une réaction d'oxydo-réduction.	*Illustrer un transfert spontané d'électrons par contact entre réactifs et par l'intermédiaire d'un circuit extérieur.*
Pile, demi-piles, pont salin ou membrane, tension à vide. Fonctionnement d'une pile ; réactions électrochimiques aux électrodes. Usure d'une pile, capacité électrique d'une pile.	Justifier la stratégie de séparation des réactifs dans deux demi-piles et l'utilisation d'un pont salin. Modéliser et schématiser, à partir de résultats expérimentaux, le fonctionnement d'une pile. Déterminer la capacité électrique d'une pile à partir de sa constitution initiale. *Réaliser une pile, déterminer sa tension à vide et la polarité des électrodes, identifier la transformation mise en jeu, illustrer le rôle du pont salin.*
Oxydants et réducteurs usuels.	Citer des oxydants et des réducteurs usuels : eau de Javel, dioxygène, dichlore, acide ascorbique, dihydrogène, métaux. Justifier le caractère réducteur des métaux du bloc s.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 136

SITUATION 1

Les réactions d'oxydoréduction ont été modélisées en enseignement de spécialité de 1re. Il s'agit ici de vérifier que les élèves savent les reconnaître.

› Exemple de réponse attendue

Il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction, car il y a échange d'électrons entre les réactifs.

› En classe de Terminale

Les réactions d'oxydoréduction seront très présentes dans ce chapitre, tout particulièrement lors de l'étude des piles. Il faudra les reconnaître

et être capable de compter le nombre d'électrons échangés entre les réactifs. Les **activités 1** et **3** permettent de réactiver ces savoir-faire.

SITUATION 2

La relation entre le pH et la concentration en quantité de matière en ions H_3O^+ a été vue au chapitre 2. Il s'agit de vérifier que les élèves s'en souviennent.

› Exemple de réponse attendue

$\left[H_3O^+\ (aq)\right] = 10^{-pH}$ donc :

$\left[H_3O^+\right] = 10^{-3,5} = 3,2 \times 10^{-4}\ mol \cdot L^{-1}$

› En classe de Terminale

La mesure du pH permet de connaître les quantités de matières de tous les réactifs présents au cours d'une réaction acide-base, et de calculer le quotient de réaction Q_r ou la constante d'équilibre K(T) d'une telle réaction (**activité 2**).

SITUATION 3

Il s'agit de vérifier que les élèves connaissent les notions de transformation totale et non totale, qui ont été vues en enseignement de spécialité de 1re.

› Exemple de réponse attendue

La transformation est non totale car l'état final est différent de l'état maximal.

› En classe de Terminale

Une réaction non totale est modélisée par deux réactions opposées qui conduisent à des vitesses de disparition et d'apparition égales dans l'état final, ce qui correspond à un état d'équilibre dynamique du système.

ACTIVITÉS

p. 138 ACTIVITÉ 1

À la recherche des réactifs disparus

Commentaires pédagogiques

Au cours de cette activité, les élèves doivent, à partir d'expériences simples, mettre en évidence le fait que lorsqu'une transformation chimique s'arrête, tous les réactifs sont encore présents.

› Expérience et exploitation

1. b. $n(Pb^{2+})_i = 1,00 \times 10^{-1} \times 0,010 = 0,0010$ mol

$n(I^-)_i = 1,00 \times 10^{-1} \times 0,020 = 0,0020$ mol

$n(I^-)_i = 2 \times n(Pb^{2+})_i$, donc les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. Les deux réactifs sont alors limitants.

c. Si la réaction est totale, le filtrat contient des ions K^+ (aq) et NO_3^- (aq).

d. Il s'agit d'ions spectateurs, ici K^+ (aq) et NO_3^- (aq).

2. Oui, car on observe la formation d'un précipité jaune de $PbCrO_4$ (s).

3. Oui, car on observe la formation d'un précipité jaune clair de AgI (s).

4. a. Non car, les deux réactifs étant théoriquement limitants, il ne devrait plus en rester à la fin de la réaction.

b. La transformation chimique cesse alors qu'il reste encore des réactifs.

› Conclusion

5. a. Non, c'est le cas de la transformation étudiée.

b. Exemples d'hypothèses possibles :

« C'est un problème de cinétique : la réaction n'est pas encore terminée. » (c'est faux, car la réaction est instantanée et, si on attend plus longtemps, on obtient le même résultat).

« Les deux réactifs n'étaient pas exactement dans les proportions stœchiométriques. » (c'est faux, un des deux devrait quand même être totalement consommé à la fin).

p. 139 ACTIVITÉ 2

État final d'un système

Commentaires pédagogiques

Au cours de cette activité, les élèves doivent mettre en évidence, par conductimétrie, le fait que la constante d'équilibre K(T) ne dépend pas des quantités initiales de réactifs.

› Expérience et exploitation

1. a. On trouve environ :

$\sigma_1 = 5,0 \times 10^{-2}\ S \cdot m^{-1}$ et $\sigma_2 = 1,6 \times 10^{-2}\ S \cdot m^{-1}$.

L'incertitude-type se calcule en divisant l'écart-type par la racine carrée de l'effectif.

b. La dispersion s'explique par les incertitudes liées à la tolérance de l'appareil de mesure, à la position de la sonde dans la solution, à l'étalonnage de l'appareil, à la précision avec laquelle les solutions ont été préparées, au rinçage de la verrerie avant le TP, etc.

Cette dispersion est satisfaisante si l'incertitude-type est inférieure ou égale à 10 % de la valeur moyenne.

2.

Équation	$CH_3CO_2H\ (\ell) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows CH_3CO_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	n_0	excès	0	0
intermédiaire	$n_0 - x$	excès	x	x
final	$n_0 - x_f$	excès	x_f	x_f
maximal	$n_0 - x_{max}$	excès	x_{max}	x_{max}

avec : $n_0 = 0{,}010$ mol pour la solution S_1 ;
$n_0 = 0{,}0010$ mol pour la solution S_2.

3.

	Solution S_1
$\left[H_3O^+\,(aq)\right]_f$ (mol · L^{-1})	$\dfrac{\sigma_1}{(\lambda_{CH_3CO_2^-} + \lambda_{H_3O^+})} = 1{,}3\times10^{-3}$
$\left[CH_3CO_2^-\,(aq)\right]_f$ (mol · L^{-1})	$1{,}3\times10^{-3}$
$\left[CH_3CO_2H\,(aq)\right]_f$ (mol · L^{-1})	$c_1 - 1{,}3\times10^{-3} = 0{,}099$
$\tau = \dfrac{\left[CH_3CO_2^-\,(aq)\right]_f}{\left[CH_3CO_2H\,(aq)\right]_i}$	$\dfrac{1{,}3\times10^{-3}}{0{,}10} = 0{,}013 = 1{,}3\ \%$
$K(T) = \dfrac{\left[CH_3CO_2^-\,(aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+\,(aq)\right]_f}{\left[CH_3CO_2H\,(aq)\right]_f}$	$\dfrac{(1{,}3\times10^{-3})^2}{0{,}099} = 1{,}7\times10^{-5}$

	Solution S_2
$\left[H_3O^+\,(aq)\right]_f$ (mol · L^{-1})	$4{,}1\times10^{-4}$
$\left[CH_3CO_2^-\,(aq)\right]_f$ (mol · L^{-1})	$4{,}1\times10^{-4}$
$\left[CH_3CO_2H\,(aq)\right]_f$ (mol · L^{-1})	0,0096
$\tau = \dfrac{\left[CH_3CO_2^-\,(aq)\right]_f}{\left[CH_3CO_2H\,(aq)\right]_i}$	$\dfrac{4{,}1\times10^{-4}}{0{,}010} = 0{,}041 = 4{,}1\ \%$
$K(T) = \dfrac{\left[CH_3CO_2^-\,(aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+\,(aq)\right]_f}{\left[CH_3CO_2H\,(aq)\right]_f}$	$\dfrac{(4{,}1\times10^{-4})^2}{0{,}0096} = 1{,}7\times10^{-5}$

4. On obtient $\tau_1 < \tau_2$ et $K(T)_1 \approx K(T)_2$.

› Conclusion

5. a. Non, car l'avancement est inférieur à 1.
b. L'avancement dépend de la composition initiale du système (plus l'acide est dilué, plus l'avancement est élevé) alors que $K(T)$ ne dépend pas de la composition initiale du système.

p. 140 **ACTIVITÉ 3**

Réalisation d'une pile

Commentaires pédagogiques

Au cours de cette activité, les élèves doivent mettre en évidence la nécessité de séparer les réactifs pour constituer une pile. Ils devront ensuite réaliser différentes piles, modéliser leur fonctionnement et établir quelques grandeurs caractéristiques (tension à vide, polarité, sens du courant).

Partie 1

› Expérience et exploitation

2. a. Visuellement, il ne se passe rien.
b. La solution bleue se décolore, la poudre de zinc se recouvre d'une couche rougeâtre et la température du milieu réactionnel augmente.

3. a. Cu^{2+}, Zn^{2+} et SO_4^{2-}.
b. Il s'est passé quelque chose lorsqu'on a ajouté la poudre de zinc Zn (s). La solution d'ions cuivre Cu^{2+} (aq) s'est décolorée et du cuivre solide rouge Cu (s) est apparu. Les couples qui interviennent dans la transformation chimique sont :
$Cu^{2+}\,(aq)\,/\,Cu\,(s)$ et $Zn^{2+}\,(aq)\,/\,Zn\,(s)$.

c. On observe la disparition de Cu^{2+} et la formation de Cu (s), donc :
$Cu^{2+}\,(aq) + 2\,e^- = Cu\,(s)$
Le zinc solide Zn (s) est un réactif, donc :
$Zn\,(s) = Zn^{2+}\,(aq) + 2\,e^-$
D'où l'équation d'oxydoreduction :
$Zn\,(s) + Cu^{2+}\,(aq) \rightarrow Zn^{2+}\,(aq) + Cu\,(s)$

4. La température du milieu réactionnel augmente, la transformation chimique est exothermique, il y a conversion d'énergie chimique en énergie thermique.

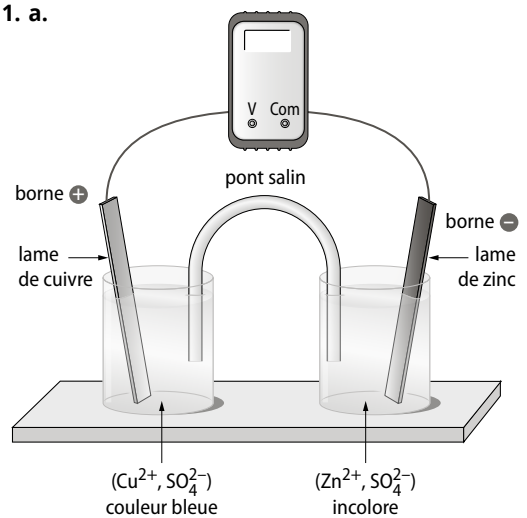
› Conclusion

5. a. $Q_{r,i} = 1{,}0$
b. Si $Q_{r,i} < K(T)$, alors le système évolue dans le sens direct.
c. Ici, on a bien $Q_{r,i} < K(T)$ et on a observé la disparition des ions $Cu^{2+}(aq)$ et la formation de cuivre solide Cu (s), ce qui correspond bien à une évolution dans le sens direct.

Partie 2

› Expérience et exploitation

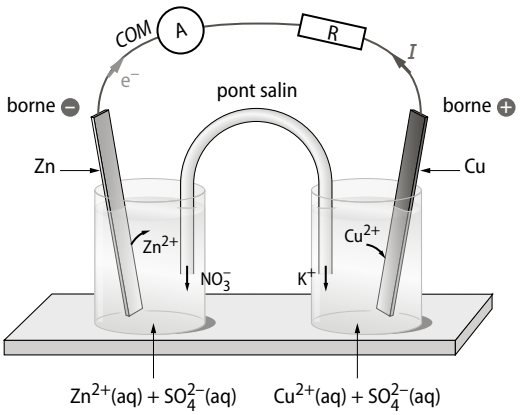
1. a.



b. La borne COM est reliée à la lame de zinc. La borne + est la lame de cuivre.

c. Sur le voltmètre, on lit 1,1 V.

2. a.



b. On lit environ $I = 200$ mA.

c. À l'extérieur de la pile, le courant va de la borne + vers la borne – (voir schéma ci-dessus).

d. Il y a production d'électrons sur la lame de zinc :

$Zn\,(s) = Zn^{2+}\,(aq) + 2\,e^-$

Il y a consommation d'électrons sur la lame de cuivre :

$Cu^{2+}\,(aq) + 2\,e^- = Cu\,(s)$

e. L'équation d'oxydoréduction est :

$Zn\,(s) + Cu^{2+}\,(aq) \rightarrow Zn^{2+}\,(aq) + Cu\,(s)$

f. Le zinc est un réactif, il disparaît au cours de la transformation, donc la masse de l'électrode de zinc diminue au cours du fonctionnement de la pile. Inversement, la masse de l'électrode de cuivre augmente.

g. Si l'on retire le pont salin, la pile ne fonctionne plus : l'ampèremètre indique 0 mA. Le circuit électrique n'est plus fermé. Le pont salin permet donc de fermer le circuit électrique. Par le déplacement des ions qu'il contient, il permet aussi de conserver la neutralité des solutions.

h. Voir schéma ci-dessus.

› Conclusion

3. a. On lit $U = 0{,}45$ V.

b. La borne + est la lame de cuivre et la borne – est la lame de plomb.

c. Oui.

d. On lit $U = 0{,}63$ V.

e. La borne + est la lame de plomb et la borne – est la lame de zinc.

f. Non, car la lame de plomb constitue la borne + de la pile cuivre-plomb, mais elle constitue la borne – de la pile plomb-zinc.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel *p. 146*

1 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le taux d'avancement final se calcule à partir du réactif limitant.
La proposition C est une bonne réponse.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, à l'état d'équilibre dynamique, les proportions relatives des réactifs et des produits peuvent être différentes de 50 %.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, à l'état d'équilibre dynamique, les réactions directe et opposée continuent de se produire.
La proposition C est une bonne réponse.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, au numérateur, doivent figurer les produits de la réaction.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car il manque les exposants.

4 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car K(T) ne dépend que de la température.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car K(T) est une constante de la transformation étudiée.

5 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, pour prédire le sens d'évolution du système, il faut comparer Q_r et K(T).
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, si $Q_r > K(T)$, alors l'évolution a lieu dans le sens opposé.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car cela dépend aussi de la valeur de K(T).
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car cela dépend aussi de la valeur de Q_r.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la réaction se produit aussi si les réactifs ne sont pas séparés.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la séparation des réactifs n'accélère pas la réaction.

8 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car c'est une lampe qui transforme l'énergie électrique en lumière, et non une pile.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car c'est la quantité de réactif limitant qui détermine la capacité d'une pile.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

10 La proposition A n'est pas une bonne réponse car c'est une demi-équation d'oxydoréduction.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, à la borne + d'une pile, des électrons sont consommés.
La proposition C est une bonne réponse.

11 La proposition A n'est pas une bonne réponse car les deux grandeurs ne sont pas liées.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

12 Les propositions A et B ne sont pas de bonnes réponses car, selon la nature de la borne qu'il constitue (positive ou négative), un métal peut voir sa masse diminuer ou augmenter.
La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases

p. 148

1. Transformations non totales

13 **a.** Réaction non totale.
b. Réaction totale. **d.** Réaction non totale.
c. Réaction non totale. **e.** Réaction totale.

14 La transformation 1 est totale car un des réactifs (A) est totalement consommé à la fin.
La transformation 2 est non totale car il reste des réactifs lorsque la transformation n'évolue plus.

15 L'état final 2 correspond à une transformation non totale, car à l'état final, tous les produits et tous les réactifs sont présents dans le milieu réactionnel.

16 **1.**

Équation	**A** + **2 B** ⇄ **3 C** + **D**			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	4	**12**	5	0
intermédiaire	**2**	8	**11**	2
final	1	**6**	**14**	**3**
maximal	**0**	4	**17**	**4**

2. $x_f = 3$ mol et $x_{max} = 4$ mol

3. $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}} = \dfrac{3}{4} = 0{,}75$

4. Oui.

5. Elle n'est pas totale car $\tau < 1$.

17 **1.**

Équation	$C_2H_5CO_2H\,(\ell) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows C_2H_5CO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	0,15	excès	0	0
intermédiaire	$0{,}15 - x$	excès	x	x
final	$0{,}15 - x_f$	excès	x_f	x_f
maximal	$0{,}15 - x_{max}$	excès	x_{max}	x_{max}

2. $x_f = n(H_3O^+)_f = 1{,}26 \times 10^{-3}$ mol

$0{,}15 - x_{max} = 0$ donc $x_{max} = 0{,}15$ mol.

3. $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}} = \dfrac{1{,}26 \times 10^{-3}}{0{,}15} = 0{,}0084$

4. Oui.

5. Non, car $\tau < 1$.

18 **1.**

Équation	**NaCl (s)** ⇄ Na^+ **(aq)** + Cl^- **(aq)**		
État	**Quantités de matière** (en mol)		
initial	n_0	0	0
intermédiaire	$n_0 - x$	x	x
final	$n_0 - x_f$	x_f	x_f
maximal	$n_0 - x_{max}$	x_{max}	x_{max}

Dans le premier cas :

$$n_0 = \frac{m(\text{NaCl})}{M(\text{NaCl})} = \frac{50}{23{,}0 + 35{,}5} = 0{,}85 \text{ mol}$$

Dans le deuxième cas :

$$n_0 = \frac{m(\text{NaCl})}{M(\text{NaCl})} = \frac{400}{23{,}0 + 35{,}5} = 6{,}8 \text{ mol}$$

2. Dans le premier cas :

$x_f = x_{max} = n_0 = 0{,}85$ mol

Dans le deuxième cas :

$$x_f = n_0 - n_{restant} = 6{,}8 - \frac{64}{23 + 35{,}5} = 5{,}7 \text{ mol}$$

$x_{max} = n_0 = 6{,}8$ mol donc :

$$\tau = \frac{5{,}7}{6{,}8} = 0{,}84 = 84\ \%$$

3. Dans le premier cas, la transformation est totale alors que dans le deuxième cas, elle ne l'est pas.

› 2. Quotient de réaction et constante d'équilibre

19 **a.** $Q_r = \dfrac{1}{\left[Ag^+\,(aq)\right] \cdot \left[Cl^-\,(aq)\right]}$

car AgCl est solide.

b. $Q_r = \dfrac{\left[HCO_2^-\,(aq)\right] \cdot \left[H_3O^+\,(aq)\right]}{\left[HCO_2H\,(aq)\right]}$

car H_2O est un solvant.

c. $Q_r = \left[Ba^{2+}\,(aq)\right] \cdot \left[SO_4^{2-}\,(aq)\right]$ car $BaSO_4$ est solide.

d. $Q_r = \dfrac{\left[Al^{3+}\,(aq)\right]^2}{\left[Zn^{2+}\,(aq)\right]^3}$ car Al et Zn sont solides.

e. $Q_r = \left[SO_4^{2-}\,(aq)\right] \cdot \left[H_3O^+\,(aq)\right]^2$

car H_2SO_4 est solide et H_2O est un solvant.

f. $Q_r = \dfrac{\left[Fe^{2+}\,(aq)\right]^2 \cdot \left[S_4O_6^{2-}\,(aq)\right]}{\left[Fe^{3+}\,(aq)\right]^2 \cdot \left[S_2O_3^{2-}\,(aq)\right]^2}$

20 **1.** $Q_{r,i} = \dfrac{\left[C_6H_5CO_2^-\,(aq)\right]_i \cdot \left[H_3O^+\,(aq)\right]_i}{\left[C_6H_5CO_2H\,(aq)\right]_i}$

$= \dfrac{0 \times 0}{\dfrac{0,30}{2,0}} = 0$

2. $K(T) = \dfrac{\left[C_6H_5CO_2^-\,(aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+\,(aq)\right]_f}{\left[C_6H_5CO_2H\,(aq)\right]_f}$

$= \dfrac{\dfrac{0,0061}{2,0} \times \dfrac{0,0061}{2,0}}{\dfrac{0,294}{2,0}} = 6,3 \times 10^{-5}$

21 **1.** $Q_r = \dfrac{\left[SO_3^{2-}\,(aq)\right] \cdot \left[H_2S\,(aq)\right]}{\left[HSO_3^-\,(aq)\right] \cdot \left[HS^-\,(aq)\right]}$

Système 1 : $Q_{r,1} = \dfrac{0,300 \times 0,300}{0,300 \times 0,300} = 1,00$

Système 2 : $Q_{r,2} = \dfrac{0,177 \times 0,301}{0,379 \times 0,223} = 0,630$

Système 3 : $Q_{r,3} = \dfrac{0,120 \times 0,120}{0,245 \times 0,326} = 0,180$

2. Le système 2 est à l'équilibre car $Q_{r,2} = 0,630 = K(T)$.

› 3. Prévoir le sens d'évolution

22 **1.** $K(T) = \dfrac{\left[Fe^{2+}\,(aq)\right]_f^2 \cdot \left[I_2\,(aq)\right]_f}{\left[Fe^{3+}\,(aq)\right]_f^2 \cdot \left[I^-\,(aq)\right]_f^2}$

2. $Q_{r,1} = \dfrac{(1,2 \times 10^{-1})^2 \times 3,0 \times 10^{-3}}{(4,1 \times 10^{-3})^2 \times (2,5 \times 10^{-3})^2} = 4,1 \times 10^5 > K(T)$

Le système 1 évolue dans le sens opposé.

$Q_{r,2} = \dfrac{(6,1 \times 10^{-2})^2 \times 2,1 \times 10^{-2}}{(9,2 \times 10^{-3})^2 \times (4,3 \times 10^{-3})^2} = 5,0 \times 10^4 = K(T)$

Le système 2 est à l'équilibre.

$Q_{r,3} = \dfrac{0,18^2 \times 0,11}{0,040^2 \times 0,025^2} = 3,6 \times 10^3 < K(T)$

Le système 3 évolue dans le sens direct.

23 *Une erreur s'est glissée sur le spécimen du professeur dans l'équation de la réaction chimique. Il faut lire :*
$2\,Fe^{3+}\,(aq) + Cu\,(s) \rightleftarrows 2\,Fe^{2+}\,(aq) + Cu^{2+}\,(aq)$
Cette erreur a été rectifiée sur le manuel élève et les manuels numériques.

1. $Q_{r,i} = \dfrac{\left[Fe^{2+}\,(aq)\right]^2 \cdot \left[Cu^{2+}\,(aq)\right]}{\left[Fe^{3+}\,(aq)\right]^2}$

$= \dfrac{\left(\dfrac{0,015}{0,200}\right)^2 \times \dfrac{0,010}{0,200}}{\left(\dfrac{0,030}{0,200}\right)^2} = 0,013$

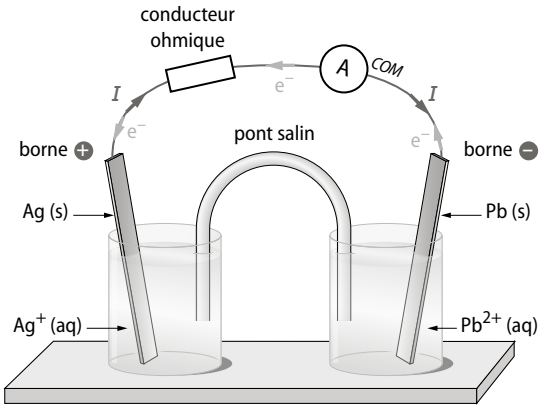
2. $Q_{r,i} < K(T)$. L'évolution a lieu dans le sens direct, c'est-à-dire dans le sens de la formation des ions $Cu^{2+}\,(aq)$. C'est cohérent avec l'observation d'un intensification de la couleur bleue de la solution.

› 4. Les piles

24 Le schéma B est correct. Le schéma A n'est pas correct : il manque le pont salin. Le schéma C n'est pas correct : les demi-piles ne sont pas constituées de couples oxydant-réducteur.

25 **1.** $Pb\,(s) + 2\,Ag^+\,(aq) \rightarrow Pb^{2+}\,(aq) + 2\,Ag\,(s)$

2.



3. $Pb\,(s) = Pb^{2+}\,(aq) + 2\,e^-$

$Ag^+\,(aq) + e^- = Ag\,(s)$

4. Le courant va de la borne + (Ag) à la borne – (Pb) et les électrons vont dans le sens inverse (voir schéma ci-avant).

26 **1.** $Cd\,(s) = Cd^{2+}\,(aq) + 2\,e^-$

$Ag^+\,(aq) + e^- = Ag\,(s)\quad (\times 2)$

$Cd\,(s) + 2\,Ag^+\,(aq) \rightarrow Cd^{2+}\,(aq) + 2\,Ag\,(s)$

2. $n(Cd)_i = \dfrac{m_{Cd}}{M_{Cd}} = \dfrac{30}{112{,}4} = 0{,}27$ mol

$n(Ag)_i = \dfrac{m_{Ag}}{M_{Ag}} = \dfrac{30}{108{,}0} = 0{,}28$ mol

$n(Ag^+)_i = n(Cd^{2+})_i = c \cdot V = 0{,}15 \times 0{,}250 = 0{,}038$ mol

Équation	**Cd (s) + 2 Ag⁺ (aq) → Cd²⁺ (aq) + 2 Ag (s)**			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	0,27	0,038	0,038	0,28
intermédiaire	$0{,}27 - x$	$0{,}038 - 2x$	$0{,}038 + x$	$0{,}28 + 2x$
maximal	$0{,}27 - x_{max}$	$0{,}038 - 2x_{max}$	$0{,}038 + x_{max}$	$0{,}28 + 2x_{max}$

Si Cd est limitant, alors $0{,}27 - x_{max} = 0$
et $x_{max} = 0{,}27$ mol.

Si Ag^+ est limitant, alors $0{,}038 - 2x_{max} = 0$
et $x_{max} = 0{,}019$ mol.

$0{,}019 < 0{,}27$, donc Ag^+ est limitant.

3. $q_{max} = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$
$= n(Ag^+)_i \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}$
$= 3{,}6 \times 10^3$ C

27 $O_2\,(g) + 4\,H^+\,(aq) + 4\,e^- = 2\,H_2O\,(\ell)$
$C_3H_6O_3\,(aq) = C_3H_4O_3\,(aq) + 2\,H^+\,(aq) + 2\,e^-$
L'équation de la réaction d'oxydoréduction est :
$2\,C_3H_6O_3\,(aq) + O_2\,(g) \rightarrow 2\,C_3H_4O_3\,(aq) + 2\,H_2O\,(\ell)$

Faire le point avant d'aller plus loin p. 149

◗ ***Énoncer le critère d'évolution spontanée d'un système***.

Si $Q_r < K(T)$, l'évolution a lieu dans le sens direct.
Si $Q_r > K(T)$, l'évolution a lieu dans le sens opposé.
Si $Q_r = K(T)$, on est dans l'état d'équilibre dynamique.

◗ ***Définir le taux d'avancement final d'une réaction***.

Le taux d'avancement final est le rapport de l'avancement final mesuré par l'avancement maximal théorique :

$$\tau = \frac{x_f}{x_{max}}$$

◗ ***Définir la constante d'équilibre K(T) d'un système chimique***.

En solution aqueuse, à chaque réaction chimique d'équation $a\,A + b\,B \rightleftarrows c\,C + d\,D$, on associe une constante d'équilibre K(*T*), définie par :

$$K(T) = \frac{[C]_f^c \cdot [D]_f^d}{[A]_f^a \cdot [B]_f^b}$$

◗ ***Définir la capacité d'une pile***.

La capacité électrique q_{max} d'une pile représente la quantité maximale de charges électriques qu'elle peut fournir au cours de son fonctionnement.

◗ ***Écrire l'expression du quotient de réaction Q_r pour l'équilibre associé à cette réaction chimique.***

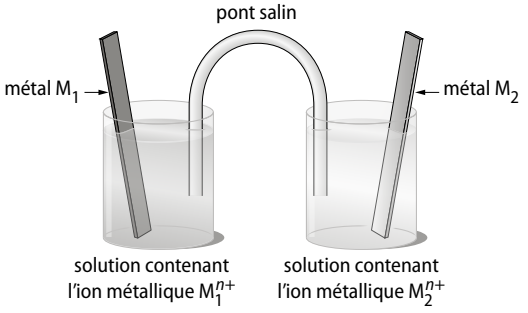
A (aq) + 2 B (aq) ⇄ C (s) + D (aq)

Le quotient de réaction s'écrit $Q_r = \dfrac{[D]}{[A] \cdot [B]^2}$.

◗ ***Expliquer le modèle de l'équilibre dynamique d'un système chimique***.

À l'état d'équilibre dynamique, les réactions directe et opposée continuent de se produire, mais se compensent exactement.

◗ ***Schématiser une pile***.



◗ ***Expliquer le fonctionnement d'une pile***.

Dans une pile en fonctionnement, une transformation chimique d'oxydoréduction se produit. Le système étant hors équilibre, on a Q_r qui tend vers K(*T*), des électrons sont échangés entre les réactifs, ce qui produit un courant électrique.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 150 et 151

29 **1.**

Équation	$C_2H_4O_2(\ell) + C_{10}H_{18}O(\ell) \rightleftarrows C_{12}H_{20}O_2(\ell) + H_2O(\ell)$			
État	n_{acide}	n_{alcool}	n_A	n_{eau}
initial	1,0	1,0	0	0
intermédiaire	$1,0 - x$	$1,0 - x$	x	x
final	$1,0 - x_f$	$1,0 - x_f$	x_f	x_f
maximal	$1,0 - x_{max}$	$1,0 - x_{max}$	x_{max}	x_{max}

À t_1 (état intermédiaire), on a :
$n_A = n_{eau} = x(t_1) = 2,35 \times 10^{-4}$ mol, donc :

$n_{acide} = n_{alcool} = 1,0 - x(t_1) = 1,0 - 2,35 \times 10^{-4} \approx 1,0$ mol

2. $Q_r = \dfrac{[A] \cdot [eau]}{[acide] \cdot [alcool]} = \dfrac{n_A \cdot n_{eau}}{n_{acide} \cdot n_{alcool}}$

$= \dfrac{(2,35 \times 10^{-4})^2}{1,0^2} = 5,5 \times 10^{-8}$

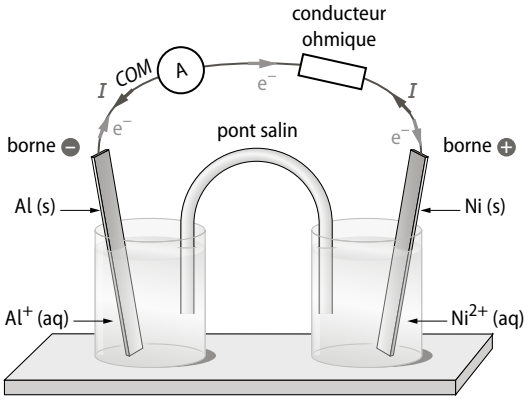
3. $5,5 \times 10^{-8} < 1,23 \times 10^{-2}$, donc $Q_r < K(T)$: on n'est pas à l'équilibre et l'évolution a lieu dans le sens direct.

4. À t_2 (état final) : $n_A = x_f = 9,87 \times 10^{-3}$ mol.
À l'état maximal, $1,0 - x_{max} = 0$ donc $x_{max} = 1,0$ mol.

On calcule
$\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}} = \dfrac{9,87 \times 10^{-3}}{1,0} = 9,87 \times 10^{-3} \approx 0,01\,\%$.

On a $\tau < 100\,\%$, donc la transformation n'est pas totale.

31 **1.**



2. a. La masse de l'électrode de nickel augmente, d'où la demi-équation 1 :

$Ni^{2+}(aq) + 2\,e^- = Ni(s)$

La masse de l'électrode d'aluminium diminue, d'où la demi-équation 2 :

$Al(s) = Al^{3+}(aq) + 3\,e^-$

b. En multipliant par 3 la demi-équation 1 et par 2 la demi-équation 2, on obtient :

$3\,Ni^{2+}(aq) + 2\,Al(s) \rightarrow 3\,Ni(s) + 2\,Al^{3+}(aq)$

c. D'après les demi-équations, des électrons sont produits du côté de l'électrode d'aluminium et consommés du côté de l'électrode de nickel, donc les électrons se déplacent à l'extérieur de la pile de l'électrode d'aluminium vers l'électrode de nickel.

d. Le courant circule dans le sens opposé, de l'électrode de nickel (borne +) vers l'électrode d'aluminium (borne –).

3. $q_{max} = 3 \cdot n_{Al} \cdot N_A \cdot e$

$= 3 \times \dfrac{15,0}{27,0} \times 6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19}$

$= 1,6 \times 10^5$ C

S'entraîner pour maîtriser

p. 152

32 **1.** L'état d'équilibre est dynamique et non statique car, à l'état d'équilibre, il continue de se produire deux phénomènes (réaction directe et opposée) qui se compensent.

2. $Q_r = [Na^-(aq)] \cdot [Cl^-(aq)] = 0,50^2 = 0,25$

3. $Q_r < K(T)$, le système n'est pas à l'équilibre, il évolue dans le sens direct. La quantité de sel solide diminue.

33 ***Deux équilibres distincts***

1. *Associer à chaque photo l'expression correspondante parmi « équilibre dynamique » et « équilibre statique ».*

2. *Quelle est la différence principale entre ces deux types d'équilibre ?*

1. La photo de gauche correspond à l'équilibre statique, celle de droite à l'équilibre dynamique.

2. À l'équilibre statique, rien ne se passe. À l'équilibre dynamique, en permanence, le système agit de façon à compenser son déséquilibre (c'est le cas de l'homme sur la photo).

34 Transformation **A** :

1. $n(acide)_i = \dfrac{m}{M} = \dfrac{15,0}{60} = 0,25$ mol

et $n(alcool)_i = \dfrac{m}{M} = \dfrac{12,0}{60} = 0,20$ mol.

Équation	$C_2H_4O_2$ + $C_3H_8O \rightleftarrows C_5H_{10}O_2 + H_2O$			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	0,25	0,20	0	0
intermédiaire	$0,25 - x$	$0,20 - x$	x	x
final	$0,25 - x_f$	$0,20 - x_f$	x_f	x_f
maximal	$0,25 - x_{max}$	$0,20 - x_{max}$	x_{max}	x_{max}

2. $x_f = n(\text{ester})_f = \dfrac{m}{M} = \dfrac{11,6}{102} = 0,114$ mol

C_3H_8O est limitant et $x_{max} = 0,20$ mol.

$$\tau = \frac{x_f}{x_{max}} = \frac{0,114}{0,20} = 0,57 = 57\ \%$$

3. Oui, car la réaction n'est pas totale.

Transformation **B** :

1. $n(\text{anhydride})_i = \dfrac{m}{M} = \dfrac{30,6}{102} = 0,30$ mol

et $n(\text{alcool})_i = \dfrac{m}{M} = \dfrac{9,0}{60} = 0,15$ mol.

Équation	$C_4H_6O_3$ + $C_3H_8O \rightleftarrows C_5H_{10}O_2 + C_2H_4O_2$			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	0,30	0,15	0	0
intermédiaire	$0,30 - x$	$0,15 - x$	x	x
final	$0,30 - x_f$	$0,15 - x_f$	x_f	x_f
maximal	$0,30 - x_{max}$	$0,15 - x_{max}$	x_{max}	x_{max}

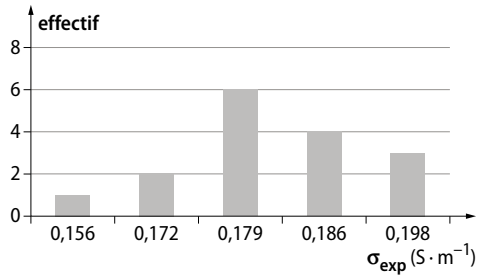
2. $x_f = n(\text{ester})_f = \dfrac{m}{M} = \dfrac{15,3}{102} = 0,15$ mol

C_3H_8O est limitant et $x_{max} = 0,15$ mol.

$$\tau = \frac{x_f}{x_{max}} = \frac{0,15}{0,15} = 1,0 = 100\ \%$$

3. Non, car la réaction est totale (taux d'avancement égal à 1).

35 **1. a.**



b. On trouve $\overline{\sigma_{exp}} = 0,182$ S · m^{-1}.

c. On trouve $s_\sigma = 0,0105$ S · m^{-1} et l'incertitude-type $u(\sigma_{exp}) = 0,003$.

d. La dispersion peut être liée à l'incertitude liée à la tolérance de l'appareil de mesure, à la position de la sonde dans la solution, à l'étalonnage de l'appareil, à la précision avec laquelle la dilution a été effectuée, au rinçage de la verrerie avant le TP, etc.

Cela est satisfaisant si l'incertitude-type est inférieure ou égale à 10 % de la valeur moyenne.

Ici $\dfrac{u(\sigma_{exp})}{\overline{\sigma_{exp}}} = \dfrac{0,003}{0,182} = 1,6\ \%$.

La dispersion est satisfaisante.

2. et **3.**

Équation	$CH_3CO_2H\ (\ell) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows CH_3CO_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	0,13	excès	0	0
intermédiaire	$0,13 - x$	excès	x	x
final	$0,13 - x_f$	excès	x_f	x_f
maximal	$0,13 - x_{max}$	excès	x_{max}	x_{max}

4. $\sigma_{th} = \lambda_{CH_3CO_2^-} \cdot \left[CH_3CO_2^-\right] + \lambda_{H_3O^+} \cdot \left[H_3O^+\right]$

$\sigma_{th} = 0,13 \times 10^3 \times (4,1 \times 10^{-3} + 3,5 \times 10^{-2})$

$= 5,1$ S · m^{-1}

5. Non, la réaction n'est pas totale car :

$\sigma_{exp} < 5,1$ S · m^{-1}.

6. $\tau < 1$ car la réaction n'est pas totale.

7. $\sigma_{exp} = (\lambda_{CH_3CO_2^-} + \lambda_{H_3O^+}) \cdot \dfrac{x_f}{V}$

donc $x_f = \dfrac{\sigma_{exp} \cdot V}{\lambda_{CH_3CO_2^-} + \lambda_{H_3O^+}}$

$$= \frac{0,182 \times 0,001}{4,1 \times 10^{-3} + 3,5 \times 10^{-2}} = 0,0047 \text{ mol}$$

D'autre part, $x_{max} = 0,13$ mol.

Donc $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}} = \dfrac{0,0047}{0,13} = 0,036 = 3,6\ \%$,

ce qui confirme la réponse à la question 5 (réaction non totale).

36 **1.** $Cu^{2+}\ (aq) / Cu\ (s)$ et $Fe^{3+}\ (aq) / Fe^{2+}\ (aq)$.

2. C'est une espèce spectatrice.

3. $\left[Cu^{2+}\ (aq)\right] = \dfrac{0,010}{3} = 0,0033$ mol · L^{-1} ;

$\left[Fe^{2+}\ (aq)\right] = \dfrac{0{,}015}{3} = 0{,}0050\ mol \cdot L^{-1}$

$\left[Fe^{3+}\ (aq)\right] = \dfrac{0{,}020}{3} = 0{,}0067\ mol \cdot L^{-1}$

4. $Q_{r,i} = \dfrac{\left[Fe^{2+}\ (aq)\right]^2 \cdot \left[Cu^{2+}\ (aq)\right]}{\left[Fe^{3+}\ (aq)\right]^2}$

$= \dfrac{0{,}0050^2 \times 0{,}033}{0{,}0667^2} = 0{,}0018$

5. $Q_{r,i} < K(T)$. Il y a donc évolution dans le sens direct, donc $[Fe^{2+}\ (aq)]$ augmente, conformément à ce qui est observé.

37 **1.** Ils jouent le rôle de pont salin.

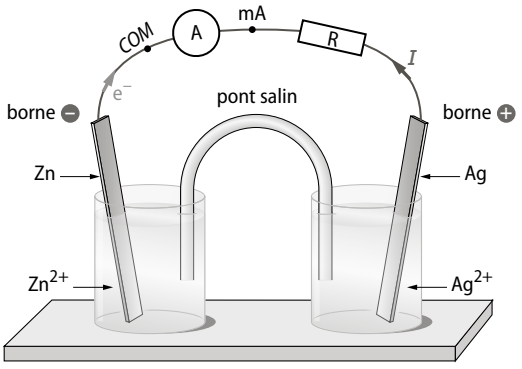
2. L'eau salée contient des ions : elle conduit mieux le courant électrique.

3. La pile peut charger un condensateur et permettre la production d'une étincelle.

4. L'association zinc-argent permet d'obtenir la tension à vide la plus élevée.

5. $U = 20 \times 1{,}6 = 32$ V

38 **1.**



2.

$Zn\ (s) = Zn^{2+}\ (aq) + 2\ e^-$

$Ag^+\ (aq) + e^- = Ag\ (s)\ (\times 2)$

$Zn\ (s) + 2\ Ag^+\ (aq) \rightarrow Zn^{2+}\ (aq) + 2\ Ag\ (s)$

3. $Q_{r,i} = \dfrac{\left[Zn^{2+}\ (aq)\right]}{\left[Ag^+\ (aq)\right]^2} = \dfrac{0{,}20}{0{,}20^2} = 5 < K(T)$.

L'évolution dans le sens direct est cohérente avec le sens du courant observé.

4. $\left[Zn^{2+}\ (aq)\right]$ augmente et $\left[Ag^+\ (aq)\right]$ diminue.

5. Le pont salin assure l'électroneutralité des solutions avec un déplacement des ions K^+ (aq) et NO_3^- (aq).

6. $n(Zn)_i = \dfrac{m(Zn)}{M_{Zn}} = \dfrac{2{,}0}{65{,}4} = 0{,}031$ mol

$n(Ag^+)_i = \left[Ag^+\right] \cdot V = 0{,}20 \times 0{,}100 = 0{,}020$ mol

Équation	**Zn (s) + 2 Ag⁺ (aq) → Zn²⁺ (aq) + 2 Ag (s)**			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	0,031	0,020	0	0
intermédiaire	$0{,}031 - x$	$0{,}020 - 2x$	x	$2x$
maximal	$0{,}031 - x_{max}$	$0{,}020 - 2x_{max}$	x_{max}	$2x_{max}$

Si Zn (s) est limitant, alors $x_{max} = 0{,}031$ mol.
Si Ag^+ (aq) est limitant, alors $x_{max} = 0{,}010$ mol.
$0{,}010 < 0{,}031$, donc Ag^+ (aq) est le réactif limitant et $x_{max} = 0{,}010$ mol.

7. $q_{max} = n_{Ag^+} \cdot N_A \cdot e$

$= 0{,}020 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}$

$= 1{,}9 \times 10^3$ C

39 **› Démarche experte**

Il faut calculer la quantité de matière de dihydrogène H_2 contenu dans le réservoir. Puis, à partir la demi-équation relative au couple H^+ / H_2, en déduire la quantité d'électrons échangés entre les réactifs et la capacité de la pile. On vérifie enfin l'indication du fabricant (voir *Démarche avancée*).

› Démarche avancée

1. $n(H_2) = \dfrac{m}{M_{H_2}} = \dfrac{5{,}0 \times 10^3}{2 \times 1{,}0} = 2{,}5 \times 10^3$ mol

2. Électrode A : $H_2\ (g) = 2\ H^+\ (aq) + 2\ e^-$

Électrode B : $O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^- = 2\ H_2O\ (g)$

3. $q_{max} = 2n_{H_2} \cdot N_A \cdot e$

$= 2 \times 2{,}5 \times 10^3 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}$

$= 4{,}8 \times 10^8\ C = 1{,}3 \times 10^5\ A \cdot h$

L'indication du fabricant est bien vérifiée.

40 **1.** $Li\ (s) = Li^+\ (aq) + e^-$

$MnO_2\ (s) + H^+\ (aq) + e^- = MnO(OH)$

Équation de réaction :

$Li\ (s) + MnO_2\ (s) + H^+\ (aq) \rightarrow Li^+\ (aq) + MnO\ (OH)\ (s)$

2. $q_{max} = n_{Li} \cdot N_A \cdot e = n_{Li} \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}$

Or $q_{max} = 220\ mA \cdot h = 7{,}9 \times 10^2$ C

Donc :

$m_{Li} = n_{Li} \cdot M_{Li} = \dfrac{7{,}9 \times 10^2}{6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}} \times 6{,}9$

$= 0{,}057$ g

41 Exemple d'exposé oral

On considère une transformation chimique modélisée par une réaction d'équation :

$A\,(aq) + B\,(aq) \rightleftarrows C\,(aq) + D\,(aq)$.

C'est une réaction non totale, c'est-à-dire que la réaction dans le sens **direct** (formation de C et D) est en partie compensée par la réaction dans le sens **opposé** (formation de A et B). La transformation cesse lorsque les deux réactions se compensent exactement, c'est-à-dire lorsqu'au cours d'une certaine durée, il se forme autant de C et D par la réaction directe qu'il en disparaît par la réaction inverse. Le système est alors dans un **état d'équilibre dynamique**, caractérisé par sa **constante d'équilibre** $K(T) = \dfrac{[C]_f \cdot [D]_f}{[A]_f \cdot [B]_f}$. Cette constante ne dépend pas des quantités initiales de réactifs.

Ainsi si, initialement, on mélange A, B, C et D dans un récipient, le **quotient de réaction** $Q_{r,i}$, défini par $Q_{r,i} = \dfrac{[C]_i \cdot [D]_i}{[A]_i \cdot [B]_i}$, est différent de $K(T)$. Le système évolue alors de manière à ce que $Q_{r,i}$ tende vers $K(T)$: c'est le critère d'évolution spontanée.

Si $Q_{r,i} < K(T)$: le système évolue dans le sens direct.

Si $Q_{r,i} > K(T)$: le système évolue dans le sens opposé.

Si $Q_{r,i} = K(T)$: le système n'évolue pas, il est à l'équilibre.

42 Exemple d'exposé oral

Cette biopile est alimentée par le glucose et le dioxygène du sang du patient dans lequel est implanté le pacemaker. Le dioxygène provient de l'air que respire le patient et le glucose provient des aliments qu'il mange. Donc, tant que le patient mange et respire, la pile est alimentée, il n'y a pas besoin de la remplacer et on considère qu'elle est inépuisable, à la différence des piles « classiques ».

Développer ses compétences p. 155

43 › Questions préliminaires

1. D'après le doc. 4, à $t = 200$ h, $n(C_7H_{14}O_2)$ n'évolue plus, donc l'état d'équilibre est atteint.

2. Initialement :

$$n(\text{acide}) = \frac{m}{M} = \frac{90}{60} = 1{,}5 \text{ mol}$$

$$n(\text{alcool}) = \frac{m}{M} = \frac{132}{88} = 1{,}5 \text{ mol}$$

Les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques, ils sont tous les deux limitants.

› Le problème à résoudre

D'après l'équation du doc. 5 et les coefficients stœchiométriques de l'équation de la transformation, on peut écrire :

$$K(T) = \frac{n(C_7H_{14}O_2)_f \cdot n(H_2O)_f}{n(C_2H_4O_2)_f \cdot n(C_5H_{12}O)_f} = \frac{1{,}0 \times 1{,}0}{0{,}5 \times 0{,}5} = 4{,}0$$

44 › Questions préliminaires

1. $Fe = Fe^{2+} + 2\ e^-$

2. Le zinc et l'aluminium sont susceptibles de protéger la coque car les potentiels standards des couples $Zn^{2+}\,(aq) / Zn\,(s)$ et $Al^{3+}\,(aq) / Al\,(s)$ sont inférieurs à celui du couple $Fe^{2+}\,(aq) / Fe\,(s)$. L'électrode est dite « sacrificielle » car le métal protecteur s'oxyde à la place du fer, il se « sacrifie ».

› Le problème à résoudre

• On calcule la charge électrique q échangée au cours de la réaction, pendant une année :

$q = I \cdot \Delta t = 0{,}400 \times 365 \times 24 \times 3\,600 = 1{,}26 \times 10^7$ C

• On calcule la quantité d'électrons échangés au cours d'une année :

$$n(e^-) = \frac{q}{N_A \cdot e} = \frac{1{,}26 \times 10^7}{9{,}64 \times 10^4} = 131 \text{ mol}$$

• D'après la demi-équation d'oxydation du zinc $Zn = Zn^{2+} + 2\ e^-$, on en déduit la quantité de zinc nécessaire :

$n(Zn) = 2 \times n(e^-) = 2 \times 131 = 262$ mol

• On en déduit enfin la masse de zinc nécessaire :

$m(Zn) = n(Zn) \cdot M(Zn) = 262 \times 65{,}4$

$= 1{,}71 \times 10^4$ g $= 17{,}1$ kg

45 › Analyse

1. L'électrode de zinc constitue la borne –, donc :

$2\ MnO_2\,(s) + Zn\,(s) + 2\ H_2O\,(\ell) \rightarrow$

$2\ MnO(OH)\,(s) + 2\ HO^-\,(aq) + Zn^{2+}\,(aq)$

2. $n(Zn) = \dfrac{m(Zn)}{M(Zn)} = \dfrac{3{,}1}{65{,}4} = 0{,}047$ mol

D'après les coefficients stœchiométriques,

$n(MnO_2) = 2 \times n(Zn)$, donc :

$n(MnO_2) = 2 \times 0{,}047 = 0{,}095$ mol et

$m(MnO_2) = n(MnO_2) \cdot M(MnO_2) = 0{,}095 \times 86{,}9 = 8{,}2$ g

› Synthèse

$$q_{max} = 2 \cdot n(Zn) \cdot N_A \cdot e$$
$$= 2 \times \frac{3{,}1}{65{,}4} \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}$$
$$= 9{,}1 \times 10^3 \text{ C}$$
$$= 2{,}5 \times 10^3 \text{ mA} \cdot \text{h}$$

C'est une valeur conforme à l'indication du fabricant.

46 **1.** $I_2\,(aq)/I^-\,(aq)$ et $S_2O_8^{2-}\,(aq)/SO_4^{2-}\,(aq)$

2. $n(I^-) = \left[I^-\right] \cdot V$

$= 0{,}10 \times 0{,}200 = 2{,}0 \times 10^{-2}$ mol

$n(S_2O_8^{2-}) = \left[S_2O_8^{2-}\right] \cdot V = 0{,}40 \times 0{,}200 = 8{,}0 \times 10^{-2}$ mol

3.

Équation	$S_2O_8^{2-}\,(aq) + 2\,I^-\,(aq) \rightleftarrows 2\,SO_4^{2-}\,(aq) + I_2\,(aq)$			
État	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	0,080	0,020	0	0
intermédiaire	$0{,}080 - x$	$0{,}020 - 2x$	$2x$	$2x$
maximal	$0{,}080 - x_{max}$	$0{,}020 - 2x_{max}$	$2x_{max}$	$2x_{max}$

4. $\left[SO_4^{2-}\right] = 2 \times \left[I_2\right]$

$$\left[I^-\right] = \frac{0{,}020 - 2x_{max}}{V} = \frac{0{,}020}{V} - \frac{2x_{max}}{V}$$

$$= \frac{0{,}020}{0{,}400} - \left[I_2\right] = 0{,}050 - \left[I_2\right]$$

$$\left[S_2O_8^{2-}\right] = \frac{0{,}080 - x_{max}}{V} = \frac{0{,}080}{V} - \frac{x_{max}}{V}$$

$$= 0{,}20 - \frac{\left[I_2\right]}{2}$$

D'où le tableau ci-dessous (les concentrations sont exprimées en mol · L^{-1}).

Instant *t*	$\left[S_2O_8^{2-}\,(aq)\right]$	$\left[I^-\,(aq)\right]$
0 min	0,20	0,050
2 min	≈ 0,20	0,045
4 min	≈ 0,20	0,041
74 min	0,183	0,0168

$\left[SO_4^{2-}\,(aq)\right]$	$\left[I_2\right]$	Q_r
0	0	0
0,010	0,0050	$1{,}2 \times 10^{-3}$
0,018	0,0090	$8{,}6 \times 10^{-3}$
0,0664	0,0332	2,83

5. Voir tableau ci-dessus.

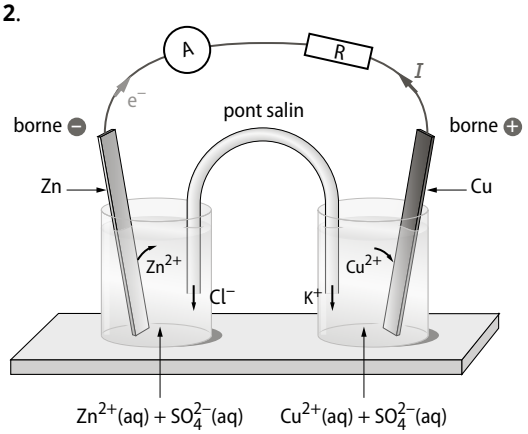
6. À $t = 74$ min, la réaction n'est pas terminée car $Q_r < K(T)$.

POUR PRÉPARER L'ECE

▮ *p. 158*

1. Réalisation d'une pile cuivre-zinc

2.



$Zn\,(s) = Zn^{2+}\,(aq) + 2\,e^-$

$Cu^{2+}\,(aq) + 2\,e^- = Cu\,(s)$

Équation d'oxydoreduction :

$Zn\,(s) + Cu^{2+}\,(aq) \rightarrow Zn^{2+}\,(aq) + Cu\,(s)$

2. Proposition de protocole expérimental

Il faut remplacer l'ampèremètre et le conducteur ohmique par un voltmètre. On mesure la tension à vide de la pile. Puis, pour simuler le vieillissement de la pile, il faut modifier les concentrations des solutions contenues dans la pile. Il faut diluer par 100 la solution d'ions Cu^{2+} en utilisant la pipette de 1 mL et la fiole de 100 mL. Il faut remplacer la solution d'ions Zn^{2+} à 0,10 mol · L^{-1} par une solution à 0,20 mol · L^{-1}. On mesure ensuite la tension à vide de cette nouvelle pile.

4. Exploitation du résultat obtenu

1. Oui.

2. Non, il n'était pas forcément nécessaire de préparer cette solution avec une très grande précision. Pour simuler le vieillissement de la pile, il suffit de faire une seconde pile avec une concentration en ions consommés nettement plus faible. Que ce soit 100 fois ou 120 fois plus faible ne change pas la conclusion : la tension à vide diminue si la pile s'use.

CHAPITRE 7

Manuel p. 160

Force des acides et des bases

LE PROGRAMME

3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique

B) Comparer la force des acides et des bases

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Constante d'acidité K_A d'un couple acide-base, produit ionique de l'eau K_e.	Associer K_A et K_e aux équations de réactions correspondantes. *Estimer la valeur de la constante d'acidité d'un couple acide-base à l'aide d'une mesure de pH.*
Réaction d'un acide ou d'une base avec l'eau, cas limite des acides forts et des bases fortes dans l'eau.	Associer le caractère fort d'un acide (d'une base) à la transformation quasi-totale de cet acide (cette base) avec l'eau. Prévoir la composition finale d'une solution aqueuse de concentration donnée en acide fort ou faible apporté. Comparer la force de différents acides ou de différentes bases dans l'eau. *Mesurer le pH de solutions d'acide ou de base de concentration donnée pour en déduire le caractère fort ou faible de l'acide ou de la base.* **Capacité numérique** : Déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, le taux d'avancement final d'une transformation, modélisée par la réaction d'un acide sur l'eau. **Capacité mathématique** : Résoudre une équation du second degré.
Solutions courantes d'acides et de bases.	Citer des solutions aqueuses d'acides et de bases courantes et les formules des espèces dissoutes associées : acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)), acide nitrique (H_3O^+ (aq), NO_3^- (aq)), acide éthanoïque (CH_3COOH (aq)), soude ou hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)), ammoniac (NH_3 (aq)).
Diagrammes de prédominance et de distribution d'un couple acide-base ; espèce prédominante, cas des indicateurs colorés et des acides alpha-aminés.	Représenter le diagramme de prédominance d'un couple acide-base. Exploiter un diagramme de prédominance ou de distribution. Justifier le choix d'un indicateur coloré lors d'un titrage. **Capacité numérique** : Tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un couple acide-base de pK_A donné.
Solution tampon.	Citer les propriétés d'une solution tampon.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

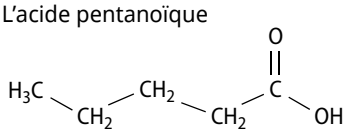
p. 160

SITUATION 1

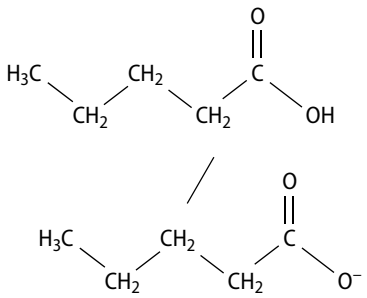
Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis dans le chapitre 1 la notion de couple acide-base, en particulier le fait que la base conjuguée d'un acide carboxylique est un ion carboxylate.

› Exemple de réponse attendue

L'acide pentanoïque



appartient au couple acide-base suivant :



› En classe de Terminale

L'**activité 1** permet d'étudier la réaction de deux acides carboxyliques (acide méthanoïque et acide éthanoïque) avec l'eau et de déterminer, par une mesure du pH, le pK_A de chacun des couples auxquels appartiennent ces acides carboxyliques. L'**activité 2** permet de voir que les acides carboxyliques sont faibles, à travers l'étude de plusieurs solutions d'acides.

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier un acquis du chapitre 1, à savoir qu'un acide carboxylique peut réagir avec une amine jouant le rôle de base lors d'une transformation acide-base modélisée par un transfert d'ion hydrogène.

› Exemple de réponse attendue

La réaction qui modélise la transformation est :
$HCOOH\,(aq) + C_2NH_7\,(aq) \rightleftarrows HCOO^-\,(aq) + C_2NH_8^+(aq)$

› En classe de Terminale

Les élèves utiliseront dans ce chapitre la réaction modélisant la transformation totale d'un acide avec une base lors d'un titrage acido-basique et justifieront le choix d'un indicateur coloré dans l'**activité 4**.

SITUATION 3

Cette troisième situation permet de vérifier que les élèves connaissent la relation existant entre la concentration en quantité de matière des ions oxonium dans une solution aqueuse et la valeur du pH.

› Exemple de réponse attendue

La concentration en quantité de matière des ions oxonium dans la solution aqueuse est $[H_3O^+\,(aq)]$.
On réalise le calcul en appliquant la formule :
$[H_3O^+\,(aq)] = c^\circ \cdot 10^{-pH}$.
On sait que $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}, donc :
$[H_3O^+\,(aq)] = 10^{-pH} = 10^{-2,5}$ soit :
$[H_3O^+\,(aq)] = 3{,}2 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}

› En classe de Terminale

Dans les **activités 1 et 2**, les élèves mesurent le pH de solutions et déduisent la concentration en quantité de matière des ions oxonium dans chacune des solutions. La valeur de cette concentration aboutit dans l'**activité 1** à la détermination de la constante d'acidité de couples et dans l'**activité 2** à la détermination du taux d'avancement final de la réaction d'un acide avec l'eau.

ACTIVITÉS

p. 162 **ACTIVITÉ 1**

Constante d'acidité d'un couple acide-base

Commentaires pédagogiques

L'objectif de cette activité est d'estimer la valeur de la constante d'acidité d'un couple acide-base à l'aide d'une mesure de pH.

› Expériences et analyse

1. a. pH = 2,9, d'où :
$[H_3O^+\,(aq)] = 10^{-pH} = 10^{-2,9}$
$= 1{,}26 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}

b. Si la réaction était totale, à l'état final, $[H_3O^+\,(aq)]$ vaudrait $c_A = 1{,}00 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}. Ce n'est pas le cas, donc la réaction est un équilibre chimique.

c. $n(H_3O^+\,(aq)) = [H_3O^+\,(aq)] \cdot V$
$= 1{,}26 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-3}$
$= 1{,}26 \times 10^{-4}$ mol

d. $n(AH)_{initial} = c_A \cdot V$
$= 1{,}00 \times 10^{-1} \times 0{,}100$
$= 1{,}00 \times 10^{-2}$ mol

Le tableau d'avancement est donné ci-dessous.

État	Avancement	$CH_3CO_2H\,(aq)$	+	$H_2O\,(\ell)$	$\rightleftarrows$	$CH_3CO_2^-\,(aq)$	+	$H_3O^+\,(aq)$
initial	0	$1{,}00 \times 10^{-2}$		excès		0		0
en cours	x	$1{,}00 \times 10^{-2} - x$		excès		x		x
final	x_f	$1{,}00 \times 10^{-2} - 1{,}26 \times 10^{-4} = 9{,}99 \times 10^{-3}$		excès		$1{,}26 \times 10^{-4}$		$1{,}26 \times 10^{-4}$

2. a. On prélève 10,0 mL de solution A avec une pipette jaugée de 10,0 mL que l'on verse dans une fiole jaugée de 100 mL. On complète jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. On homogénéise.

b. pH = 3,4

$[H_3O^+ (aq)] = 10^{-pH} = 10^{-3,4}$

$= 3,98 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1}

$n(H_3O^+ (aq)) = [H_3O^+ (aq)] \cdot V_A$

$= 3,98 \times 10^{-4} \times 100 \times 10^{-3}$

$= 3,98 \times 10^{-5}$ mol

$n(AH)_{initial} = c_A \cdot V$

$= 1,00 \times 10^{-2} \times 0,100 = 1,00 \times 10^{-3}$ mol

Le tableau d'avancement est donné en pied de page.

› Conclusion

3. a.

	Solution A	Solution B
$\left[CH_3CO_2H (aq)\right]_f$ (en mol · L^{-1})	$9,99 \times 10^{-2}$	$9,60 \times 10^{-3}$
$\left[CH_3CO_2^- (aq)\right]_f$ (en mol · L^{-1})	$1,26 \times 10^{-3}$	$3,98 \times 10^{-4}$
$\left[H_3O^+ (aq)\right]_f$ (en mol · L^{-1})	$1,26 \times 10^{-3}$	$3,98 \times 10^{-4}$
K_A	$1,59 \times 10^{-5}$	$1,65 \times 10^{-5}$

b. Les valeurs de K_A déterminées avec les solutions A et B sont proches de celle du document 3. La constante d'acidité d'un couple ne dépend pas des quantités initiales.

c. La constante d'acidité d'un couple dépend de la nature du couple et de la température (doc. 3).

p. 163 **ACTIVITÉ 2**

Force des acides et des bases

Commentaires pédagogiques et expérimentaux

L'objectif de cette activité est de mesurer le pH de solutions d'acide ou de base de concentration donnée pour en déduire le caractère fort ou faible de l'acide ou de la base. Les solutions aqueuses d'acide et de base choisies sont celles que les élèves doivent pouvoir citer. Cela doit leur permettre de connaître les formules des espèces dissoutes dans chacune de ces solutions.

Exemples de mesures : $pH_1 = 3,4$; $pH_2 = 2,0$; $pH_3 = 2,0$; $pH_4 = 12,0$; $pH_5 = 10,6$

› Expériences et analyse

1. a. Le tableau d'avancement est donné en pied de page.

b. $pH_1 = 3,4$; $pH_2 = 2,0$; $pH_3 = 2,0$.

c. Le taux d'avancement final est :

$$\tau = \frac{x_f}{x_{max}} = \frac{\left[H_3O^+ (aq)\right]_f \cdot V}{c \cdot V} = \frac{\left[H_3O^+ (aq)\right]_f}{c} = \frac{10^{-pH}}{c}$$

$$\tau_1 = \frac{10^{-3,4}}{1,0 \times 10^{-2}} = 0,040 \text{ soit } 4,0 \text{ \%.}$$

$$\tau_2 = \frac{10^{-2,0}}{1,0 \times 10^{-2}} = 1,0 \text{ soit } 100 \text{ \%.}$$

$$\tau_3 = \frac{10^{-2,0}}{1,0 \times 10^{-2}} = 1,0 \text{ soit } 100 \text{ \%.}$$

Activité 1, question 2. b :

État	Avancement	CH_3CO_2H (aq)	+	H_2O (ℓ)	⇄	$CH_3CO_2^-$ (aq)	+	H_3O^+ (aq)
initial	0	$1,00 \times 10^{-3}$		excès		0		0
en cours	x	$1,00 \times 10^{-3} - x$		excès		x		x
final	x_f	$1,00 \times 10^{-3} - 3,98 \times 10^{-5} = 9,60 \times 10^{-4}$		excès		$3,98 \times 10^{-5}$		$3,98 \times 10^{-5}$

Activité 2, question 1. a :

État	Avancement	AH (aq)	+	H_2O (ℓ)	⇄	A^- (aq)	+	H_3O^+ (aq)
initial	0	$c \cdot V$		excès		0		0
en cours	x	$c \cdot V - x$		excès		x		x
final	x_f	$c \cdot V - x_f$		excès		x_f		x_f

2. a. Le tableau d'avancement est donné en pied de page.

b. $pH_4 = 12{,}0$; $pH_5 = 10{,}6$.

c. $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}} = \dfrac{\left[HO^-\ (aq)\right] \cdot V}{c \cdot V} = \dfrac{\left[HO^-\ (aq)\right]}{c}$

$= \dfrac{K_e}{c \cdot \left[H_3O^+(aq)\right]} = \dfrac{K_e}{c \cdot 10^{-pH}}$

$\tau_4 = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-14}}{1{,}0 \times 10^{-2} \times 10^{-12{,}0}} = 1{,}0$ soit 100 %.

$\tau_5 = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-14}}{1{,}0 \times 10^{-2} \times 10^{-10{,}6}} = 0{,}040$ soit 4,0 %.

› Conclusion

3. a. L'acide chlorhydrique et l'acide nitrique sont forts ($\tau \approx 1$) tandis que l'acide éthanoïque est faible ($\tau < 1$).

L'ammoniaque est une base faible ($\tau < 1$) et l'hydroxyde de sodium une base forte ($\tau \approx 1$).

b. Équation de réaction avec l'eau :

• de l'acide éthanoïque :

$CH_3CO_2H\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows CH_3COO^-_2\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$

• du chlorure d'hydrogène HCl (g) :

$HCl\ (g) + H_2O\ (\ell) \rightarrow Cl^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$

• de l'acide nitrique HNO_3 (aq) :

$HNO_3\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightarrow NO^-_3\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$

• de l'ammoniac :

$NH_3\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows NH_4^+\ (aq) + HO^-\ (aq)$

p. 164 **ACTIVITÉ 3**

Composition d'un vinaigre

Commentaires pédagogiques

Cette activité a pour objectif de prévoir la composition finale d'une solution aqueuse de concentration donnée en acide faible (apporté). Dans un premier temps, l'équation dont la solution est le taux d'avancement est établie. Celle-ci est ensuite résolue de deux manières, permettant de mobiliser deux capacités exigibles du programme : une capacité numérique (« À l'aide d'un langage de programmation, déterminer le taux d'avancement final d'une transformation, modélisée par la réaction d'un acide sur l'eau ») et une capacité mathématique (« Résoudre une équation du second degré »).

› Pistes de résolution

1. Le degré p d'un vinaigre est :

$p = \dfrac{m_{acide}}{m_{vinaigre}} \times 100 = \dfrac{c \cdot V \cdot M}{\rho \cdot V} \times 100$

$= \dfrac{c \cdot M}{\rho} \times 100$

D'où $c = \dfrac{p \cdot \rho}{M \times 100}$.

$c = \dfrac{10 \times 1{,}01}{(4 \times 12{,}0 + 4 \times 1{,}0 + 2 \times 16{,}0) \times 100}$

$= 1{,}20 \times 10^{-3}\ mol \cdot L^{-1}$

2. Le tableau d'avancement est donné en pied de page.

L'avancement maximal est :

$x_{max} = c \cdot V$, donc $c = \dfrac{x_{max}}{V}$.

Le taux d'avancement final est $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}}$,

donc $x_f = x_{max} \cdot \tau$.

La concentration effective de chacune des espèces présentes est :

$\left[A^-\ (aq)\right]_f = \left[H_3O^+\ (aq)\right]_f = \dfrac{x_f}{V} = \dfrac{x_{max} \cdot \tau}{V}$

$= c \cdot \tau$

$\left[AH\ (aq)\right]_f = \dfrac{c \cdot V - x_f}{V} = \dfrac{x_{max} - x_{max} \cdot \tau}{V}$

$= \dfrac{x_{max} \cdot (1 - \tau)}{V} = c \cdot (1 - \tau)$

Activité 2, question 2. a :

État	Avancement	A^- (aq)	+	H_2O (ℓ)	⇄	AH (aq)	+	HO^- (aq)
initial	0	$c \cdot V$		excès		0		0
en cours	x	$c \cdot V - x$		excès		x		x
final	x_f	$c \cdot V - x_f$		excès		x_f		x_f

Activité 3, question 2 :

État	Avancement	CH_3CO_2H (aq)	+	H_2O (ℓ)	⇄	$CH_3CO_2^-$ (aq)	+	H_3O^+ (aq)
initial	0	$c \cdot V$		excès		0		0
en cours	x	$c \cdot V - x$		excès		x		x
final	x_f	$c \cdot V - x_f$		excès		x_f		x_f

La constante d'acidité K_A du couple s'écrit donc :

$$K_A = \frac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1-\tau)}$$

On en déduit l'équation du second degré suivante :

$c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$

› Conclusion

3. a. On calcule le discriminant de l'équation :

$\Delta = K_A^2 + 4 \cdot K_A \cdot c$

$= (1{,}58 \times 10^{-5})^2 + 4 \times (1{,}58 \times 10^{-5}) \times (1{,}20 \times 10^{-3})$

$= 7{,}61 \times 10^{-8}$

En résolvant l'équation et en ne retenant que la solution positive, on obtient :

$$\tau = \frac{-K_A + \sqrt{\Delta}}{2 \cdot c} = 0{,}108$$

b. Le programme renvoie le même résultat.

4. La concentration effective de chacune des espèces présentes est :

$\left[CH_3CO_2^-(aq)\right]_f = \left[H_3O^+(aq)\right]_f = c \cdot \tau$

$= 1{,}20 \times 10^{-3} \times 0{,}108$

$= 1{,}30 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1}

$\left[CH_3CO_2H(aq)\right]_f = c \cdot (1-\tau)$

$= 1{,}20 \times 10^{-3} \times (1 - 0{,}108)$

$= 1{,}07 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}

p. 165 **ACTIVITÉ 4**

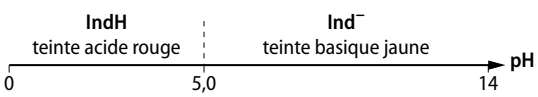
Diagramme d'un couple acide-base

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité permet de découvrir les diagrammes de prédominance et de distribution d'un couple acide-base à travers l'étude d'un indicateur coloré : le rouge de méthyle. Le document 1 présente le diagramme de prédominance dans le cas général. Il est utilisé pour représenter le diagramme de prédominance du rouge de méthyle. Le fichier Python joint au document 2, disponible sur le site ressources ou sur les manuels numériques, permet de mobiliser la capacité numérique « Tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un couple acide-base de pK_A donné ». Le diagramme ainsi tracé pour le rouge de méthyle est exploité pour déterminer sa zone de virage. Le document 3 présente la notion d'indicateur coloré et la condition permettant son utilisation lors d'un titrage.

› Exploitation et analyse

1. a.



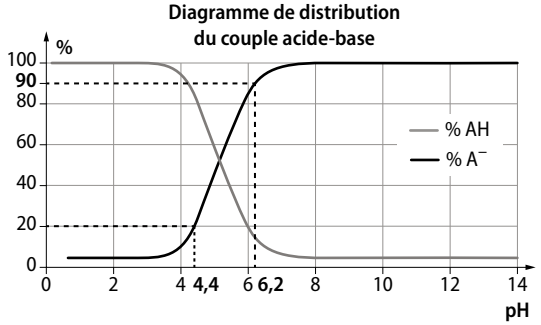
b. À pH = 8,2, c'est la forme Ind^- qui prédomine et sa teinte est jaune.

c. Dans de l'acide chlorhydrique à la concentration $c = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1} :

$pH = -\log c = -\log(1{,}0 \times 10^{-2}) = 2{,}0$.

C'est donc la forme acide IndH qui prédomine. Sa teinte est rouge.

2. a.



b. Sa zone de virage est 4,4 - 6,2 (voir lecture graphique ci-dessus).

c. Il convient pour ce titrage acido-basique car le pH à l'équivalence, qui a pour valeur 5,3, est compris dans sa zone de virage.

› Synthèse

3. Un diagramme de prédominance est un axe gradué qui permet de connaître l'espèce qui prédomine pour une valeur donnée du pH. Un diagramme de distribution est un graphique qui permet de connaître les proportions d'acide et de base conjuguée pour une valeur donnée du pH.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel

p. 172

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le produit ionique de l'eau correspond à l'autoprotolyse de l'eau (et non la réaction inverse).

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car $K_e = 10^{-pK_e} = 10^{-14} \neq 1{,}0 \times 10^{14}$.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la constante d'acidité d'un couple acide-base AH (aq) / A^- (aq) correspond à la réaction de l'acide avec l'eau.

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C est une bonne réponse.

3 La proposition A est une bonne réponse.

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car la réaction d'un acide fort avec l'eau est totale.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car l'acide nitrique est un acide fort et réagit totalement avec l'eau : $[HNO_3\,(\ell)]_f = 0$ mol · L^{-1}.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car une partie de l'acide éthanoïque initial a réagi.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car cette relation n'est pas valable pour un acide faible comme l'acide éthanoïque.
La proposition C est une bonne réponse.

6 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car l'axe vertical donne le pourcentage de base et d'acide conjugués.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car l'acide prédomine si pH $<$ pK_A et la base prédomine si pH $>$ pK_A.
La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases

p. 173

› 1. Réaction avec l'eau

9 **1.** $K_e = [H_3O^+\,(aq)]_f \cdot [HO^-\,(aq)]_f$

2. $2\,H_2O\,(\ell) \rightleftarrows H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$

10 **1.** L'équation chimique de l'équilibre est :
$NH_4^+\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows NH_3\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

2. L'expression de la constante d'acidité K_A du couple $NH_4^+\,(aq)$ / $NH_3\,(aq)$ est :

$$K_A = \frac{\left[NH_3\,(aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+\,(aq)\right]_f}{\left[NH_4^+\,(aq)\right]_f}$$

3. On réalise le calcul en appliquant la formule :
pK_A = – log K_A soit $K_A = 10^{-pK_A}$.
$K_A = 10^{-9,2} = 6,3 \times 10^{-10}$

11 • Pour le jus de pomme :

$$[H_3O^+\,(aq)] = 10^{-pH} = 10^{-3,2} = 6,3 \times 10^{-4}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$[HO^-\,(aq)] = \frac{K_e}{\left[H_3O^+\,(aq)\right]} = \frac{1,0 \times 10^{-14}}{6,3 \times 10^{-4}}$$

$$= 1,6 \times 10^{-11}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

• Pour le lait :

$$pH = -\log[H_3O^+(aq)] = -\log(2,0 \times 10^{-7}) = 6,7$$

$$[HO^-\,(aq)] = \frac{K_e}{\left[H_3O^+(aq)\right]}$$

$$= \frac{1,0 \times 10^{-14}}{2,0 \times 10^{-7}} = 5,0 \times 10^{-8}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

• Pour l'eau minérale :

$$[H_3O^+(aq)] = \frac{K_e}{\left[HO^-\,(aq)\right]}$$

$$= \frac{1,0 \times 10^{-14}}{3,1 \times 10^{-7}} = 3,2 \times 10^{-8}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$pH = -\log[H_3O^+(aq)] = -\log(3,2 \times 10^{-8}) = 7,5$$

• Pour le soda au cola :

$$[H_3O^+(aq)] = 10^{-pH} = 10^{-2,5}$$

$$= 3,2 \times 10^{-3}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$[HO^-\,(aq)] = \frac{K_e}{\left[H_3O^+(aq)\right]}$$

$$= \frac{1,0 \times 10^{-14}}{3,2 \times 10^{-3}} = 3,1 \times 10^{-12}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

D'où le tableau suivant (les valeurs des concentrations sont données en mol · L^{-1}) :

Boisson	Jus de pomme	Lait	Eau minérale	Soda au cola
pH	3,2	6,7	7,5	2,5
$[H_3O^+\,(aq)]$	$6,3 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-3}$
$[HO^-\,(aq)]$	$1,6 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-12}$

12 **1.** Le couple acide-base auquel appartient l'acide perchlorique est le couple :
$HClO_4\,(aq)$ / $ClO_4^-\,(aq)$.

2. L'acide perchlorique est fort car sa transformation avec l'eau est totale.

13 **1. a.** La base conjuguée de l'acide méthanoïque est l'ion HCO_2^- (ion méthanoate).
b. Un acide faible est un acide qui ne réagit pas totalement avec l'eau : la transformation conduit à un équilibre chimique.

2. L'équation chimique de la réaction est :
$HCO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows HCO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

3. La constante de cet équilibre chimique est la constante d'acidité K_A du couple acide méthanoïque / ion méthanoate. Son expression est :

$$K_A = \frac{[HCO_2^-\,(aq)]_f \cdot [H_3O^+\,(aq)]_f}{[HCO_2H\,(aq)]_f}$$

14 **1.** NH_3, CN^- et $CH_3CO_2^-$ sont des bases car elles captent un ion hydrogène H^+.

2. NH_3 et $CH_3CO_2^-$ sont des bases faibles car leurs transformations avec l'eau sont des équilibres chimiques. CN^- est une base forte car sa transformation avec l'eau est totale.

› 2. Solutions d'acide ou de base

15 **1.** La transformation avec l'eau étant totale, une solution aqueuse d'acide nitrique ne contient pas de molécules d'acide nitrique HNO_3.

2. $HNO_3\,(\ell) + H_2O\,(\ell) \rightarrow NO_3^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

Alors : $[NO_3^-\,(aq)]_f = [H_3O^+\,(aq)]_f$

$= c = 5{,}0 \times 10^{-3}\ mol \cdot L^{-1}$.

3. On réalise le calcul en appliquant la relation :

$$pH = -\log\left(\frac{\left[H_3O^+\right]}{c^\circ}\right).$$

On sait que $c^\circ = 1\ mol \cdot L^{-1}$, donc :

$pH = -\log([H_3O^+]) = -\log(5{,}0 \times 10^{-3}) = 2{,}3$.

16 **1.** L'équation de la réaction est :

$HCl\,(g) + H_2O\,(\ell) \rightarrow Cl^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$.

2. Il s'agit d'acide chlorhydrique.

3. $c = \frac{n}{V} = \frac{8{,}3 \times 10^{-2}}{5{,}0} = 1{,}7 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$

4. La transformation étant totale,

$[HCl\,(g)]_f = 0\ mol \cdot L^{-1}$;

$[H_3O^+\,(aq)]_f = [Cl^-\,(aq)]_f = 1{,}7 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$

5. $pH = -\log[H_3O^+\,(aq)] = -\log(1{,}7 \times 10^{-2}) = 1{,}8$

17 **1.** Cette solution est notée ($Na^+\,(aq)$, $HO^-\,(aq)$) car les ions $Na^+\,(aq)$ et $HO^-\,(aq)$ sont les seules espèces dissoutes (hormis les ions oxonium, présents dans toute solution aqueuse).

2. La soude est une base forte, donc :

$\left[HO^-\,(aq)\right]_f = [Na^+\,(aq)]_f = c = 3{,}0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$

18 **1.** Si un acide est fort, sa transformation avec l'eau est totale. $[H_3O^+\,(aq)] = c$ et :

$pH = -\log[H_3O^+\,(aq)] = -\log(1{,}0 \times 10^{-2}) = 2{,}0$.

L'acide sulfamique H_2NSO_3H est donc un acide fort.

2. Sachant que la concentration c est la même pour chacun des acides, moins un acide est faible, plus il réagit avec l'eau, plus $[H_3O^+\,(aq)]$ est grand et plus le pH est petit (se rapproche de 2,0, valeur de pH pour un acide fort calculée à la question 1). On en déduit le classement selon l'ordre croissant de leur force : $HClO$; HF ; $HClO_2$; H_2NSO_3H.

3. Plus le pK_A d'un couple est petit, plus l'acide est fort.

19 **1.** $c = \frac{n}{V}$

$c = \frac{2{,}5 \times 10^{-3}}{0{,}250} = 1{,}0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$

2. $K_e = [H_3O^+\,(aq)]_f \cdot [HO^-\,(aq)]_f$

$[HO^-\,(aq)]_f = \frac{K_e}{[H_3O^+(aq)]_f}$

$= \frac{1{,}0 \times 10^{-14}}{10^{-10{,}6}}$

$= 4{,}0 \times 10^{-4}\ mol \cdot L^{-1}$

3. Le tableau d'avancement est donné en pied de page.

$x_f = [HO^-\,(aq)]_f \cdot V$

Or $\tau = \frac{x_f}{x_{max}} = \frac{\left[HO^-\,(aq)\right]_f \cdot V}{c \cdot V} = \frac{\left[HO^-\,(aq)\right]_f}{c}$.

4. $\tau = \frac{4{,}0 \times 10^{-4}}{1{,}0 \times 10^{-2}} = 0{,}04 = 4\ \%$

L'ammoniac est donc une base faible.

20 **1.** L'équation et le tableau d'avancement sont donnés en pied de page.

2. D'après le tableau d'avancement :

$x_f = n_f(H_3O^+\,(aq)) = [H_3O^+\,(aq)] \cdot V = 10^{-pH} \cdot V$

$= 10^{-2{,}8} \times 200 \times 10^{-3} = 3{,}2 \times 10^{-4}$ mol.

3. $[AH\,(aq)]_f = \frac{n_f(AH\,(aq))}{V} = \frac{c \cdot V - x_f}{V}$

$= \frac{2{,}5 \times 10^{-2} \times 200 \times 10^{-3} - 3{,}2 \times 10^{-4}}{200 \times 10^{-3}}$

$= 2{,}3 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$

Exercice 19, question 3 :

État	$NH_3\,(aq)$	+	$H_2O\,(\ell)$	$\rightleftarrows$	$NH_4^+\,(aq)$	+	$HO^-\,(aq)$
initial	$c \cdot V$		solvant		0		0
en cours	$c \cdot V - x$		solvant		x		x
final	$c \cdot V - x_f$		solvant		x_f		x_f

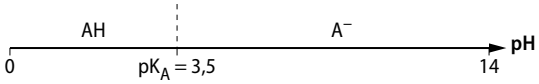
Exercice 20, question 1 :

État	x	$AH\,(aq)$	+	$H_2O\,(\ell)$	$\rightleftarrows$	$A^-\,(aq)$	+	$H_3O^+\,(aq)$
initial	0	$c \cdot V$		solvant		0		0
en cours	x	$c \cdot V - x$		solvant		x		x
final	$x_f = c \cdot V$	$c \cdot V - x_f$		solvant		x_f		x_f

$$[A^-(aq)]_f = \frac{n_f(A^-(aq))}{V} = \frac{x_f}{V}$$
$$= \frac{3{,}2\times10^{-4}}{200\times10^{-3}}$$
$$= 1{,}6\times10^{-3}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

› 3. Diagramme d'un couple

21 **1.** Voici le diagramme de prédominance du couple de l'aspirine :



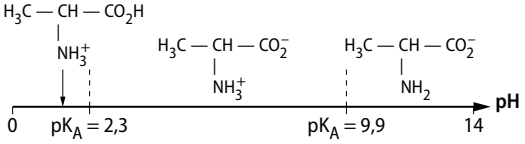
2. Ainsi, dans un verre d'eau de pH égal à 7,0, c'est la base conjuguée A^- qui prédomine.
Dans l'estomac (pH = 1,5), c'est la forme acide AH de l'aspirine qui prédomine.

22 **1.** $—NH_2$ est un groupe amine et —COOH est un groupe carboxyle. Le groupe carboxyle a des propriétés acides en solution et le groupe amine a des propriétés basiques.

2. On constitue les deux couples acide-base auxquels appartiennent ces espèces en sachant qu'il y a une différence d'un ion hydrogène H^+ entre l'acide et la base conjuguée :
$H_3C—CH(NH_3^+)—CO_2H$ / $H_3C—CH(NH_3^+)—CO_2^-$;
$H_3C—CH(NH_3^+)–CO_2^-$ / $H_3C—CH(NH_2)—CO_2^-$.

3. Le premier couple comporte la forme acide et la forme basique du groupe carboxyle, son pK_A est $pK_{A1} = 2{,}3$. Le second couple comporte la forme acide et la forme basique du groupe amine, son pK_A est $pK_{A2} = 9{,}9$.

4. Le diagramme de prédominance est donc :



5. À pH = 11,2, c'est la forme $H_3C—CH(NH_2)—CO_2^-$ qui prédomine.

23 **1.** Le pH des solutions tampon ne varie pas lors d'une dilution.

2. Le pH des solutions tampon varie peu par addition modérée d'acide ou de base.

3. De nombreux milieux biologiques, dont le sang, ont des pH compris entre 6 et 8.

24 **1.** **A** Le pH à l'équivalence est égal à 7,0, l'indicateur coloré adapté est le BBT car sa zone de virage (6,0 – 7,6) contient le pH à l'équivalence.

B Le pH à l'équivalence est environ égal à 5,0, l'indicateur coloré adapté est le rouge de méthyle car sa zone de virage (4,2 – 6,2) contient le pH à l'équivalence.

2. **A** La teinte du BBT passera du jaune au bleu à l'équivalence.

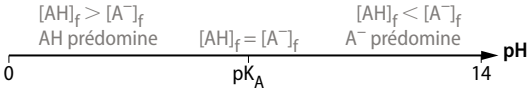
B La teinte du rouge de méthyle passera du jaune au rouge à l'équivalence.

Faire le point avant d'aller plus loin p. 175

◗ ***Définir un acide faible, une base faible, un acide fort, une base forte.***
Un acide faible (respectivement une base faible) ne réagit pas totalement avec l'eau : la transformation conduit à un équilibre chimique.
Un acide fort (respectivement une base forte) réagit totalement avec l'eau.

◗ ***Écrire l'équation de l'équilibre dont K_e est la constante.***
$2\ H_2O\ (\ell) \rightleftarrows H_3O^+\ (aq) + HO^-\ (aq)$

◗ ***Tracer le diagramme de prédominance d'un couple acide-base.***



◗ ***Citer les propriétés d'une solution tampon.***
Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu par addition d'une petite quantité d'acide ou de base, et par dilution modérée.

◗ ***Écrire l'équation de l'équilibre dont la constante d'acidité K_A est la constante.***
$AH\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows A^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$

◗ ***Citer des solutions aqueuses d'acides et de bases courantes, et les formules des espèces dissoutes.***

Solution d'acide ou de base	Formule de l'espèce dissoute
Acide éthanoïque	CH_3COOH
Acide chlorhydrique	HCl
Acide nitrique	HNO_3
Soude	$NaOH$
Ammoniac	NH_3

◗ ***Expliquer comment choisir un indicateur coloré lors d'un titrage acide-base.***
La zone de virage de l'indicateur coloré doit contenir le pH à l'équivalence du titrage.

◗ ***Expliquer comment on peut prévoir la composition d'une solution d'acide fort, puis d'acide faible.***
Un acide fort réagit totalement avec l'eau, donc dans une solution d'acide fort de concentration apportée c, $[H_3O^+] = c$.

Un acide faible ne réagit pas totalement avec l'eau. Pour trouver la composition d'une solution d'acide fort de concentration apportée c, il faut résoudre une équation du second degré qui fait intervenir la constante d'acidité K_A du couple.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 176 et 177

26 **1.** $C_7H_6O_2\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows C_7H_5O_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

L'avancement maximal est :

$x_{max} = c \cdot V$, donc $c = \dfrac{x_{max}}{V}$.

Le taux d'avancement final est : $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}}$,

donc $x_f = x_{max} \cdot \tau$.

• $[C_7H_5O_2^-\,(aq)]_f = \dfrac{x_f}{V} = \dfrac{x_{max} \cdot \tau}{V} = c \cdot \tau$

• $[C_7H_6O_2\,(aq)]_f = \dfrac{c \cdot V - x_f}{V} = \dfrac{x_{max} - x_{max} \cdot \tau}{V}$

$= \dfrac{x_{max} \cdot (1-\tau)}{V} = c \cdot (1 - \tau)$

2. La constante d'acidité K_A du couple s'écrit :

$K_A = \dfrac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1-\tau)}$, on en déduit l'équation du second degré : $c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$.

3. On calcule :

• la valeur de $K_A = 10^{-pKA} = 10^{-4,2} = 6,31 \times 10^{-5}$;

• le discriminant $\Delta = K_A^2 + 4\,c \cdot K_A$

$= (6,31 \times 10^{-5})^2 + 4 \times 2,0 \times 10^{-3} \times 6,31 \times 10^{-5}$

soit $\Delta = 5,1 \times 10^{-7}$, d'où la seule solution positive est

$\tau = \dfrac{-K_A + \sqrt{\Delta}}{2\,c} = 0,16$ soit 16 %.

4. • $[C_7H_5O_2^-\,(aq)]_f = c \cdot \tau = 2,0 \times 10^{-3} \times 0,16$

$= 3,2 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1}

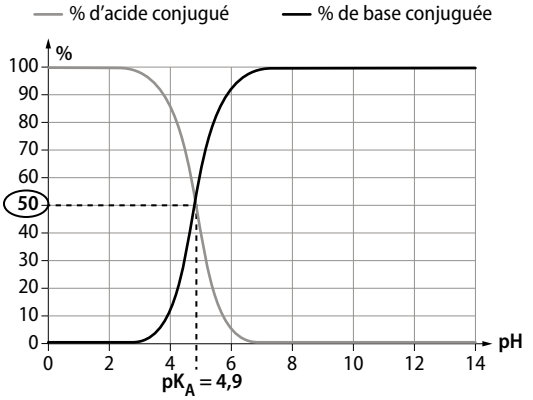
• $[C_7H_6O_2\,(aq)\,]_f = c \cdot (1 - \tau) = 2,0 \times 10^{-3} \times (1 - 0,16)$

$= 1,7 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}

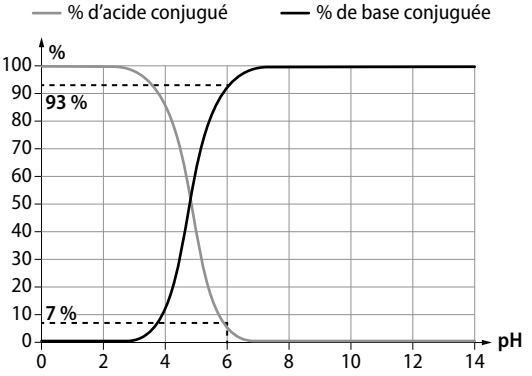
28 **1.** La constante d'acidité s'écrit :

$K_A = \dfrac{\left[C_{10}H_{19}O_2^-\,(aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+\,(aq)\right]_f}{\left[C_{10}H_{20}O_2\,(aq)\right]_f}$.

Lorsque $[C_{10}H_{20}O_2\,(aq)]_f = [C_{10}H_{19}O_2^-\,(aq)]_f$, la constante d'acidité K_A est égale à $[H_3O^+\,(aq)]_f$, donc $pK_A = pH$. On lit graphiquement : $pK_A = 4,9$.



2. a. Par lecture graphique, le pourcentage de $C_{10}H_{20}O_2$ vaut 7 % et celui de $C_{10}H_{19}O_2^-$ 93 %.



b. La concentration effective de chaque espèce conjuguée s'obtient en multipliant la concentration c par le pourcentage de chaque espèce. D'où :

• $[C_{10}H_{20}O_2\,(aq)]_f = 0,07 \times 1,52 \times 10^{-2}$

$= 1,0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}

• $[C_{10}H_{19}O_2^-\,(aq)]_f = 0,93 \times 1,52 \times 10^{-2}$

$= 1,4 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}

S'entraîner pour maîtriser

p. 178

29 **1.** $[H_3O^+(aq)] = \dfrac{x_f}{V} = \dfrac{x_{max} \cdot \tau}{V} = c \cdot \tau$.

$pH = -\log [H_3O^+(aq)] = -\log (1,0 \times 10^{-2} \times 0,13) = 2,9$

2. L'équation s'écrit :

$AH\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows A^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

Le tableau d'avancement est donné ci-dessous.

État	x	AH (aq)	+	H_2O (ℓ)	⇄	A^- (aq)	+	H_3O^+ (aq)
initial	0	$c \cdot V$		solvant		0		0
en cours	x	$c \cdot V - x$		solvant		x		x
final	$x_f = c \cdot V$	$c \cdot V - x_f$		solvant		x_f		x_f

L'avancement maximal est $x_{max} = c \cdot V$, donc $c = \frac{x_{max}}{V}$.

Le taux d'avancement final est $\tau = \frac{x_f}{x_{max}}$, donc $x_f = x_{max} \cdot \tau$.

$[A^-(aq)] = [H_3O^+] = \frac{x_f}{V} = \frac{x_{max} \cdot \tau}{V} = c \cdot \tau$

$[AH(aq)] = \frac{c \cdot V - x_f}{V} = \frac{x_{max} - x_{max} \cdot \tau}{V} = \frac{x_{max} \cdot (1-\tau)}{V}$
$= c \cdot (1-\tau)$

La constante d'acidité K_A du couple s'écrit donc :
$K_A = \frac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1-\tau)}$.

3. $K_A = \frac{(1{,}0 \times 10^{-2} \times 0{,}13)^2}{1{,}0 \times 10^{-2} \times (1-0{,}13)} = 1{,}9 \times 10^{-4}$
d'où $pK_A = -\log(1{,}9 \times 10^{-4}) = 3{,}7$, valeur proche de la valeur de référence.

30 **1. a.** La réaction d'autoprotolyse de l'eau est :
$2\,H_2O(\ell) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + HO^-(aq)$
Le produit ionique associé à la réaction est :
$K_e = [H_3O^+(aq)]_f \cdot [HO^-(aq)]_f$
b. On réalise le calcul en appliquant la relation :
$pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$.
On sait que $c^\circ = 1\ mol \cdot L^{-1}$, donc $pH = -\log([H_3O^+])$.
Il faut déterminer $[H_3O^+]$.
On a : $K_e = [H_3O^+(aq)]_f \cdot [HO^-(aq)]_f$ donc :
$[H_3O^+(aq)]_f = \frac{K_e}{[HO^-(aq)]_f}$.
À 25 °C, $K_e = 1{,}0 \times 10^{-14}\ mol \cdot L^{-1}$.
$[H_3O^+(aq)]_f = \frac{1{,}0 \times 10^{-14}}{1{,}0 \times 10^{-7}} = 1{,}0 \times 10^{-7}\ mol \cdot L^{-1}$
$pH = -\log(1{,}0 \times 10^{-7})$ soit $pH = 7{,}0$.
2. a. L'équation de la réaction entre le dioxyde de carbone dissous et l'eau est :
$CO_2(aq), H_2O(\ell) + H_2O(\ell) \rightleftarrows HCO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$
b. À pH = 5,7, on lit graphiquement que le pourcentage d'ions carbonate $CO_3^{2-}(aq)$ est nul. On peut donc négliger la réaction entre les ions carbonate $CO_3^{2-}(aq)$ et l'eau dans de l'eau distillée.
c. Le pH de l'eau distillée a tendance à diminuer car du dioxyde de carbone présent dans l'air s'y dissout. Celui-ci possède des propriétés acides et réagit donc avec l'eau pour former des ions oxonium. Comme $pH = -\log([H_3O^+(aq)])$, le pH diminue.

31 **1.** Cette amine a des propriétés basiques en solution car le pH de la solution est supérieur à 7,0.
2. La formule de l'espèce conjuguée de cette amine est l'ion triméthylammonium $(CH_3)_3NH^+$. Le couple acide-base correspondant est : $(CH_3)_3NH^+ / (CH_3)_3N$.
3. $(CH_3)_3N(aq) + H_2O(\ell) \rightleftarrows (CH_3)_3NH^+(aq) + HO^-(aq)$.
4. Le pH est supérieur à la valeur du pK_A : c'est donc la forme basique, la triméthylamine, qui prédomine en solution.
5. La constante d'acidité de ce couple s'écrit :
$K_A = \frac{[(CH_3)_3N(aq)]_f \cdot [H_3O^+(aq)]_f}{[(CH_3)_3NH^+(aq)]_f}$
$\frac{[(CH_3)_3N(aq)]_f}{[(CH_3)_3NH^+(aq)]_f} = \frac{K_A}{[H_3O^+]_f} = \frac{10^{-pK_A}}{10^{-pH}}$
$= 10^{-9{,}8+11{,}5} = 50$
Ce résultat montre à nouveau la prédominance de la forme basique pour cette valeur de pH.

32 ***La potasse caustique***
L'hydroxyde de potassium est un composé de formule KOH, communément appelé « potasse caustique ». Dans le passé, il était fabriqué par lixiviation des cendres du bois puis évaporation de la solution obtenue dans des pots en fer, laissant un résidu blanc appelé « cendres de pot ». Avec l'hydroxyde de sodium, ce solide blanc est une base forte typique. Il a de nombreuses applications industrielles.
1. *Quelle est la principale propriété de la potasse caustique ?*
2. *Définir une base forte.*
3. *La concentration molaire d'une solution d'hydroxyde de potassium est 0,02 mol · L⁻¹. Quel est le pH de cette solution ?*

1. C'est une base forte.
2. Sa transformation avec l'eau est quasi totale.
3. Pour une base forte, $[HO^-(aq)]_f = c$.
Or $pH = -\log[H_3O^+(aq)] = -\log\frac{K_e}{[HO^-(aq)]}$
$= 14 + \log c$, d'où :
$pH = 14 + \log 0{,}02 = 12{,}3$

33 **› Démarche experte**
Voir démarche avancée.

› Démarche avancée
1. a. Le tableau d'avancement est donné ci-dessous.

État	Avancement	$CH_3CO_2H(aq)$ +	$H_2O(\ell)$ ⇄	$CH_3CO_2^-(aq)$ +	$H_3O^+(aq)$
initial	0	$c \cdot V$	excès	0	0
en cours	x	$c \cdot V - x$	excès	x	x
final	x_f	$c \cdot V - x_f$	excès	x_f	x_f

L'avancement maximal est : $x_{max} = c \cdot V$ donc $c = \dfrac{x_{max}}{V}$

Le taux d'avancement final est $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}}$ donc :

$x_f = x_{max} \cdot \tau$.

La concentration effective de chacune des espèces dissoutes est :

$$\left[CH_3CO_2^- (aq)\right]_f = \left[H_3O^+(aq)\right]_f = \frac{x_f}{V}$$
$$= \frac{x_{max} \cdot \tau}{V} = c \cdot \tau$$

$$\left[CH_3CO_2H (aq)\right]_f = \frac{c \cdot V - x_f}{V} = \frac{x_{max} - x_{max} \cdot \tau}{V}$$
$$= \frac{x_{max} \cdot (1-\tau)}{V} = c \cdot (1-\tau)$$

b. La constante d'acidité K_A du couple s'écrit donc :

$$K_A = \frac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1-\tau)}$$

On en déduit l'équation du second degré :

$c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$.

2. a. On résout l'équation précédente.

Le discriminant vaut :

$\Delta = K_A^2 + 4\, K_A \cdot c$

$= (1{,}58 \times 10^{-5})^2 + 4 \times 1{,}58 \times 10^{-5} \times 8{,}0 \times 10^{-2}$

$= 5{,}06 \times 10^{-6}$

D'où la seule solution positive :

$\tau = \dfrac{-K_A + \sqrt{\Delta}}{2 \cdot c} = 0{,}014$ soit 1,4 %.

On calcule ensuite les concentrations avec les relations de la question **1. a.** :

$$\left[CH_3CO_2^- (aq)\right] = \left[H_3O^+ (aq)\right] = c \cdot \tau$$
$$= 8{,}0 \times 10^{-2} \times 0{,}014$$
$$= 1{,}1 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\left[CH_3CO_2H (aq)\right] = c \cdot (1-\tau)$$
$$= 8{,}0 \times 10^{-2} \times (1 - 0{,}014)$$
$$= 7{,}9 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

b. $pH = -\log\left[H_3O^+ (aq)\right] = -\log(1{,}1 \times 10^{-3}) = 3{,}0$

Le pH calculé correspond bien à la valeur mesurée.

34 **1.** $pH = pK_A + \log\left(\dfrac{[CH_3CO_2^- (aq)]_f}{[CH_3CO_2H (aq)]_f}\right)$

$pH = pK_A + \log 1$

$pK_A = pH = 4{,}8$

2. Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu par addition d'une petite quantité d'acide ou de base, et par dilution modérée.

3. $M_{soude} = 23{,}0 + 16{,}0 + 1{,}0 = 40{,}0$

$n = \dfrac{m}{M} = \dfrac{0{,}40}{40{,}0} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol ;

$[HO^- (aq)] = \dfrac{n}{V} = 1{,}0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, d'où :

$[H_3O^+ (aq)] = 1{,}0 \times 10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;

$pH = -\log([H_3O^+ (aq)]) = -\log(1{,}0 \times 10^{-12})$, donc $pH = 12{,}0$.

Tandis que le pH de la solution contenant le mélange d'acide éthanoïque et d'ion éthanoate varie peu, le pH de l'eau varie beaucoup (de 7,0 à 12,0) : l'eau pure n'est pas une solution tampon.

35 **1.** $HInd (aq) + H_2O (\ell) \rightleftarrows Ind^- (aq) + H_3O^+ (aq)$

$$K_A = \frac{\left[Ind^- (aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+ (aq)\right]_f}{\left[HInd (aq)\right]_f}$$

2. $K_A = \dfrac{\left[Ind^- (aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+ (aq)\right]_f}{\left[HInd (aq)\right]_f}$, donc :

$$-\log K_A = -\log \frac{\left[Ind^- (aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+ (aq)\right]_f}{\left[HInd (aq)\right]_f}$$
$$= -\log \frac{\left[Ind^- (aq)\right]_f}{\left[HInd (aq)\right]_f} - \log\left[H_3O^+(aq)\right]_f$$

D'où $pK_A = -\log \dfrac{\left[Ind^- (aq)\right]_f}{\left[HInd (aq)\right]_f} + pH$, soit :

$$pH = pK_A + \log \frac{\left[Ind^- (aq)\right]_f}{\left[HInd (aq)\right]_f}$$

3. Lorsque $\dfrac{\left[Ind^- (aq)\right]_f}{\left[HInd (aq)\right]_f} < 0{,}1$, $pH < pK_A + \log 0{,}1$.

Soit $pH < pK_A - 1{,}0$.

Donc $pH < 3{,}9$.

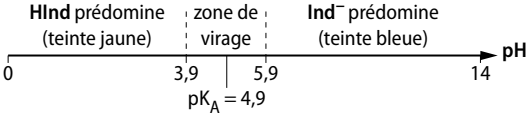
Lorsque $\dfrac{\left[Ind^- (aq)\right]_f}{\left[HInd (aq)\right]_f} > 10$, $pH > pK_A + \log 10$.

Soit $pH > pK_A + 1{,}0$.

Donc $pH > 5{,}9$.

Sa zone de virage est donc 3,9 – 5,9.

4.



5. Le vert de bromocrésol ne peut pas être utilisé pour repérer l'équivalence d'un titrage acido-basique dont le pH à l'équivalence est égal à 6,3 car cette valeur n'est pas contenue dans sa zone de virage.

36 **1.** L'objectif de la ligne 4 est de demander à l'opérateur la valeur du pK_A du couple.

2. La grandeur tracée en abscisse est le pH (ligne 12 : *plt.xlabel(« pH »)*).

3. a. *alpha(pH)* correspond au pourcentage d'acide (ligne 10 :
plt.plot(pH,alpha(pH), « r »,label= « % de AH »)).
b. La courbe correspondante est rouge, c'est la signification du « *r* » de la ligne 10 :
plt.plot(pH,alpha(pH), « r »,label= « % de AH »).
c. Considérons la relation de la ligne 6 :

$$100 \times \frac{10^{-pH}}{10^{-pH} + 10^{-pK_A}} = 100 \times \frac{\left[H_3O^+\right]}{\left[H_3O^+\right] + K_A} = 100 \times \frac{1}{1 + \frac{K_A}{\left[H_3O^+\right]}}$$

Or $K_A = \frac{\left[A^-(aq)\right]_f \cdot \left[H_3O^+(aq)\right]_f}{\left[AH(aq)\right]_f}$ d'où :

$$\frac{K_A}{\left[H_3O^+(aq)\right]_f} = \frac{\left[A^-(aq)\right]_f}{\left[AH(aq)\right]_f}.$$

Donc la relation devient :

$$100 \times \frac{1}{1 + \frac{\left[A^-(aq)\right]_f}{\left[AH(aq)\right]_f}} = 100 \times \frac{\left[AH(aq)\right]_f}{\left[AH(aq)\right]_f + \left[A^-(aq)\right]_f},$$

qui correspond bien au pourcentage d'acide conjugué.

37 **1.** Un indicateur coloré convient pour un titrage acide-base si le pH à l'équivalence est inclus dans sa zone de virage. D'après l'allure de la courbe, la valeur du pH à l'équivalence est environ égale à 8,5. On choisira donc le rouge du crésol (qui passera du jaune au rouge à l'équivalence).

2. a. La méthode des tangentes donne $V_E = 8{,}4$ mL. À l'équivalence, le réactif titré AH_2 et le réactif titrant HO^- ont été introduits dans les proportions stœchiométriques de l'équation de titrage. On en déduit qu'à l'équivalence :

$$\frac{n(AH_2)_{titrée}}{1} = \frac{n(HO^-)_{versée}}{2}$$

$$\frac{m(AH_2)_{titrée}}{M(AH_2)} = \frac{c_B \cdot V_E}{2}$$

$$\text{donc } m(AH_2)_{titrée} = \frac{c_B \cdot V_E \cdot M(AH_2)}{2}$$

$$m(AH_2)_{titrée} = \frac{1{,}0 \times 10^{-1} \times 8{,}4 \times 10^{-3} \times 116}{2}$$

soit $m(AH_2)_{titrée} = 4{,}9 \times 10^{-2}$ g.

Cependant, on a titré une prise d'essai de 10,0 mL issue d'une solution de 100,0 mL dans laquelle la gélule avait été dissoute : une gélule contient donc 10 fois plus d'acide fumarique, donc :
$m_{exp} = 10 \times m(AH_2)_{titrée}$ soit $m_{exp} = 0{,}49$ g.

$$\frac{u_{m_{exp}}}{m_{exp}} = \sqrt{\left(\frac{u_{V_E}}{V_E}\right)^2 + \left(\frac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_B}}{c_B}\right)^2}$$

$$u_{m_{exp}} = m_{exp} \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{V_E}}{V_E}\right)^2 + \left(\frac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_B}}{c_B}\right)^2}$$

$$u_{m_{exp}} = 0{,}4872 \times \sqrt{\left(\frac{0{,}1}{8{,}4}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{10{,}0}\right)^2 + \left(\frac{0{,}3 \times 10^{-2}}{1{,}0 \times 10^{-1}}\right)^2}$$

$= 0{,}017$ g $\approx 0{,}02$ g

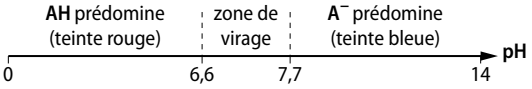
$m_{exp} = (0{,}49 \pm 0{,}02)$ g

b. Calculons le quotient : $\frac{|m_{exp} - m_{fab}|}{u_{m_{exp}}}$.

$\frac{|0{,}49 - 0{,}500|}{0{,}02} = 0{,}50$: valeur inférieure à 1 donc la valeur déterminée expérimentalement correspond aux incertitudes près à la valeur donnée par le fabricant.

38 **Exemple d'exposé oral**
La digestion des aliments dans l'estomac nécessite un milieu acide de pH environ égal à 2. Chez la plupart des mammifères, ce pH est atteint grâce à la production d'acide chlorhydrique dans l'organisme. L'acide chlorhydrique étant un **acide fort**, la **concentration en acide chlorhydrique apporté dans l'estomac de la plupart des mammifères** est donc d'environ $c = 10^{-pH} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.
Le tamanoir ne produit pas d'acide chlorhydrique dans son estomac. Pour maintenir un pH environ égal à 2, il mange des fourmis, qui contiennent de l'**acide méthanoïque**, un acide carboxylique qui est donc faible. Le pH étant inférieur au **pK_A du couple acide formique / ion formiate** (3,8), la **forme prédominante dans l'estomac du tamanoir** est donc l'acide méthanoïque. S'agissant d'un **acide faible**, sa transformation avec l'eau n'est pas totale. Pour maintenir un pH environ égal à 2, la **concentration en acide formique apporté dans l'estomac du tamanoir** doit être supérieure à la concentration en ions oxonium $[H_3O^+]$, c'est-à-dire supérieure à $10^{-pH} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

39 **Exemple d'exposé oral**
La couleur des fleurs de cette plante est due à un seul pigment connu sous l'abréviation HBA. Cette molécule possède des propriétés acido-basiques, elle existe donc sous deux formes conjuguées : une forme acide notée AH, qui est rouge, et sa base conjuguée, notée A^-, qui est bleue. Ce couple se comporte donc comme un indicateur coloré. Son pK_A n'est pas donné mais sa zone de virage est 6,6 – 7,7, ce qui permet d'en déduire le diagramme de prédominance suivant :



Le bouton de cette fleur étant rouge, son pH doit être inférieur à 6,6 au début de la floraison. Lorsque la fleur éclot, la teinte vire au bleu, on en déduit que son pH augmente alors et devient supérieur à 7,7. Le changement de couleur au cours de la floraison est donc dû à une augmentation du pH.

Développer ses compétences p. 181

40 Pour séparer les deux acides aminés, il faut qu'ils soient porteurs d'une charge électrique différente. La solution tampon de pH = 7,0 convient.
Pour la sérine, le pH du milieu étant compris entre ses deux pK_A, alors elle est sous forme globalement neutre électriquement. Elle ne migre pas.
Pour l'acide glutamique, le diagramme de distribution montre qu'il est uniquement sous sa forme anionique A^- à pH = 7,0. Il migrera vers la borne positive.

41 › Question préliminaire

Quel que soit son état de fraîcheur, le pH d'un lait est supérieur au pK_A du couple acide lactique/ion lactate, qui vaut 3,9, donc les ions lactate sont prédominants (et donc présents) dans un lait quel que soit son état de fraîcheur.

› Le problème à résoudre

Un indicateur coloré convient à un titrage pH-métrique si le pH à l'équivalence est inclus dans la zone de virage de l'indicateur coloré. D'après la courbe de titrage pH-métrique similaire donnée, le pH à l'équivalence est environ égal à 8. On choisit donc le rouge de phénol (les deux autres indicateurs changeraient de teinte avant l'équivalence).
Pour savoir si le lait dosé est frais, il faut déterminer son degré Dornic (c'est-à-dire la masse d'acide lactique dans un litre de lait) et donc exploiter les résultats du titrage réalisé par le technicien.
L'équation de la réaction support du titrage est donc :
$C_3H_6O_3\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow C_3H_5O_3^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
À l'équivalence, le réactif titré et le réactif titrant ont été introduits dans les proportions stœchiométriques, donc :
$n(C_3H_6O_3)_i = n(HO^-)_{versé\ éq}$ soit :
$c_A \cdot V_A = c_B \cdot V_B$, d'où $c_A = \dfrac{c_B \cdot V_{B_{éq}}}{V_A}$.
Or la concentration en masse est :
$c_{mA} = c_A \cdot M(C_3H_6O_3)$, donc :
$c_{mA} = \dfrac{c_B \cdot V_{B_{éq}}}{V_A} \cdot M(C_3H_6O_3)$
$= \dfrac{0{,}111 \times 2{,}1 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} \times (3 \times 12{,}0 + 6 \times 1{,}0 + 3 \times 16{,}0)$
Donc $c_{mA} = 2{,}1\ g \cdot L^{-1}$, ce qui correspond, d'après le document 1, à une acidité Dornic de 21 °D.
Le lait n'est donc pas frais car son acidité Dornic est supérieure à 18 °D.
En utilisant la soude Dornic et en titrant 10 mL de lait :
$c_{mA} = \dfrac{c_B \cdot V_{B_{éq}}}{V_A} \times M(C_3H_6O_3)$
$= \dfrac{0{,}111 \times V_{B_{éq}}}{10} \times (3 \times 12{,}0 + 6 \times 1{,}0 + 3 \times 16{,}0)$ avec $V_{B_{éq}}$ en mL. Soit $c_{mA} = V_{B_{éq}}$.

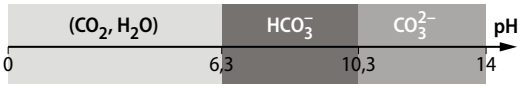
L'utilisation de la soude Dornic permet de déterminer facilement l'acidité Dornic en multipliant par 10 le volume à l'équivalence. Pour un volume à l'équivalence de 2,1 mL, l'acidité Dornic est 21 °D.

42 › Analyse

1. L'équation de la réaction est :
$CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows HCO_3^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

2. Lorsque l'on injecte du dioxyde de carbone dans l'eau, il s'y dissout en partie et l'équilibre chimique précédent s'y établit. La concentration en ions oxonium augmente, le pH diminue.

3. Diagramme de prédominance :



L'espèce prédominante est donc l'ion hydrogénocarbonate le matin (pH = 6,7) et le soir (pH = 7,5).

› Synthèse

Si le pH augmente au cours de la journée, $[H_3O^+]$ diminue.
$K_A = \dfrac{[HCO_3^-]_f \cdot [H_3O^+]_f}{[CO_2, H_2O]_f}$ est une constante.
Si le numérateur $[HCO_3^-]_f \cdot [H_3O^+]_f$ diminue ($[HCO_3^-]_f$ variant dans les mêmes proportions que $[H_3O^+]_f$), le dénominateur $[CO_2, H_2O]_f$ diminue : les plantes consomment donc plus de dioxyde de carbone qu'elles n'en produisent.
Réguler le pH consiste à éviter cette hausse liée à la diminution de la concentration en dioxyde de carbone dissous. On peut donc en injecter, au moins dans la journée comme le précise le document 1, afin de compenser la consommation des plantes.

43 **1.** ❶ : AH_3 ; ❷ : AH_2^- ; ❸ : AH^{2-} ; ❹ : A^{3-}.

2. On lit la valeur de chaque pK_A lorsque acide et base conjuguée sont en proportions égales.
$pK_{A1} = 3{,}1$; $pK_{A2} = 4{,}8$; $pK_{A3} = 6{,}4$.

3. a. La conservation de la matière implique :
$c = [AH_3] + [AH_2^-] + [AH^{2-}] + [A^{3-}]$
Dans le jus de citron, pH = 2,5, donc on peut négliger AH^{2-} et A^{3-} d'après le diagramme de prédominance : $[AH^{2-}]$ et $[A^{3-}]$ sont considérées comme nulles.

c. $c = [AH_3] + [AH_2^-]$

4. a. $[AH_2^-] = c - [AH_3]$

$$K_{A1} = \frac{\left[AH_2^-\right]_f \cdot \left[H_3O^+\right]_f}{\left[AH_3\right]_f} = \frac{\left(c - \left[AH_3\right]_f\right) \cdot \left[H_3O^+\right]_f}{\left[AH_3\right]_f}$$

$$[AH_3]_f = \frac{c \cdot \left[H_3O^+\right]_f}{K_{A1} + \left[H_3O^+\right]_f} = \frac{c \cdot 10^{-pH}}{10^{-pK_{A1}} + \left[H_3O^+\right]_f}$$

$$[AH_3]_f = \frac{1{,}5 \times 10^{-2} \times 10^{-2{,}5}}{10^{-3{,}1} + 10^{-2{,}5}} = 1{,}2 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Or $[AH_2^-]_f = c - [AH_3]_f$.

$[AH_2^-]_f = 1{,}5 \times 10^{-2} - 1{,}2 \times 10^{-2} = 0{,}3 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

b. Pourcentage de AH_3 :

$$\frac{\left[AH_3\right]_f}{c} = \frac{1{,}2 \times 10^{-2}}{1{,}5 \times 10^{-2}} = 80\ \%$$

Pourcentage de AH_2 :

$$\frac{\left[AH_2\right]_f}{c} = \frac{0{,}3 \times 10^{-2}}{1{,}5 \times 10^{-2}} = 20\ \%$$

Ces pourcentages correspondent aux valeurs lues sur le diagramme pour pH = 2,5.

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 184

1. Proposition de protocole expérimental

On réalise le titrage colorimétrique de l'aspirine contenu dans un volume V_A = 10,0 mL de la solution S.

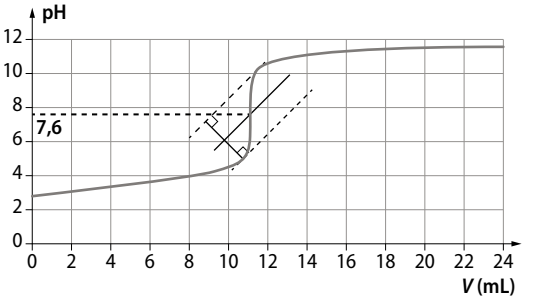
Afin de choisir un indicateur coloré adapté, on utilise le logiciel permettant de simuler la courbe pH-métrique du titrage. La concentration en aspirine de la solution S est inconnue mais on utilise la masse d'aspirine donnée sur la notice pour en avoir une estimation :

$$c_{A\ notice} = \frac{n_A}{V} = \frac{m_A}{M_A \cdot V}$$

$$= \frac{0{,}500}{(9 \times 12{,}0 + 8 \times 1{,}0 + 4 \times 16{,}0) \times 0{,}250}$$

$$= 1{,}11 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

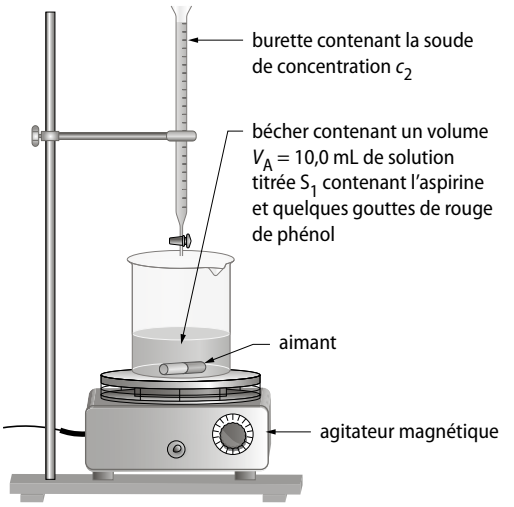
La courbe simulée du titrage pH-métrique d'une solution d'acide faible de $pK_A = 3{,}5$ de concentration $1{,}11 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1} par la soude de concentration $c_B = 1{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1} est :



Le pH à l'équivalence est de 7,6 ; on choisit donc le rouge de phénol dont la zone de virage contient la valeur du pH à l'équivalence.

Protocole du titrage :

• Prélever V_1 = 10,0 mL de la solution S et les introduire dans un bécher.
• Verser la soude dans la burette graduée.
• Mettre en place le dispositif de dosage.



2. Mise en œuvre du protocole expérimental

Verser progressivement la soude dans le bécher en maintenant l'agitation. Lorsque la solution dans le bécher passe du jaune au rouge, noter le volume de soude versé V_E. Le volume versé à l'équivalence est V_E = 10,9 mL.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. L'équation chimique de la réaction support du titrage est :
$C_9H_8O_4\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow C_9H_7O_4^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
D'après cette équation, on a :
$n(C_9H_8O_4)_{initial} = n(HO^-)_{versé\ éq}$
Soit $c_A \cdot V_A = c_B \cdot V_E$ donc $c_A = \frac{c_B \cdot V_E}{V_A}$.

La masse d'aspirine contenue dans un comprimé, et donc dans V = 250 mL de la solution S, est :

$m_A = n_A \cdot M_A = c_A \cdot V \cdot M_A$

$$m_A = \frac{c_B \cdot V_E}{V_A} \cdot V \cdot M_A$$

$$m_A = \frac{1{,}00 \times 10^{-2} \times 10{,}9 \times 10^{-3}}{10{,}0 \times 10^{-3}} \times 250 \times 10^{-3} \times (9 \times 12{,}0 + 8 \times 1{,}0 + 4 \times 16{,}0)$$

$m_A = 491 \times 10^{-3}$ g

Soit $m_A = 491$ mg.

2. La masse d'aspirine m_A déterminée expérimentalement est proche de celle annoncée par le fabricant.

Les principales sources d'erreurs et d'incertitudes sont :

– erreurs lors du prélèvement du volume V_A de la solution S titrée (rinçage de la pipette, non-respect des traits de jauges) ;

– incertitudes lors de la détermination du volume équivalent V_E (incertitude sur le changement de couleur de l'indicateur, rinçage, remplissage, lecture des graduations de la burette) ;

– incertitude sur la concentration c_B de la solution titrante.

CHAPITRE 8

Manuel p. 186

Forcer le sens d'évolution d'un système

LE PROGRAMME

3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique

C) Forcer le sens d'évolution d'un système

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Passage forcé d'un courant pour réaliser une transformation chimique.	Modéliser et schématiser, à partir de résultats expérimentaux, les transferts d'électrons aux électrodes par des réactions électrochimiques.
Constitution et fonctionnement d'un électrolyseur.	Déterminer les variations de quantité de matière à partir de la durée de l'électrolyse et de la valeur de l'intensité du courant. *Identifier les produits formés lors du passage forcé d'un courant dans un électrolyseur. Relier la durée, l'intensité du courant et les quantités de matière de produits formés.*
Stockage et conversion d'énergie chimique.	Citer des exemples de dispositifs mettant en jeu des conversions et stockages d'énergie chimique (piles, accumulateurs, organismes chlorophylliens) et les enjeux sociétaux associés.

Conformément au BO spécial n° 2 du 13 février 2020, les notions étudiées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite du baccalauréat à la date de publication du manuel.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 186

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves savent écrire les demi-équations et l'équation bilan pour une réaction d'oxydoréduction, rencontrées en 1re.

› Exemple de réponse attendue

La demi-équation du cuivre est :
$Cu\,(s) = Cu^{2+}\,(aq) + 2e^-$
Pour l'ion argent, on a :
$Ag^+\,(aq) + e^- = Ag\,(s)$
L'équation bilan est :
$Cu\,(s) + 2\,Ag^+\,(aq) \rightarrow Cu^{2+}\,(aq) + 2\,Ag\,(s)$

› En classe de Terminale

On verra que l'on peut inverser le sens d'une réaction d'oxydoréduction. L'**activité 1** permet de suivre une transformation d'oxydoréduction dans un sens, puis dans l'autre.

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves comprennent les transferts d'énergie, rencontrés en 1re.

› Exemple de réponse attendue

Lors de l'utilisation du smartphone, il y a conversion d'une énergie chimique en énergie électrique. Lors de sa recharge, il y a conversion de l'énergie électrique en énergie chimique.

› En classe de Terminale

On verra que l'on peut stocker et convertir l'énergie chimique. L'**activité 2** permet de réinvestir ces notions.

SITUATION 3

Il s'agit ici de vérifier que les élèves savent calculer un quotient de réaction et peuvent en déduire le sens d'évolution du système. Cette notion a été rencontrée en Terminale, au chapitre 6.

› Exemple de réponse attendue

L'expression du quotient de réaction est :

$$Q_{r,i} = \frac{[Cu^{2+}]_i \cdot [Br^-]_i^2}{[Br_2]_i}.$$

$$Q_{r,i} = \frac{0{,}010 \times 0{,}010^2}{0{,}010} \text{ soit } Q_{r,i} = 1 \times 10^{-4}.$$

$K(T) = 1{,}2 \times 10^{25}$ donc $Q_{r,i} < K(T)$, l'évolution du système chimique se fait dans le sens direct de l'équation donnée.

› En classe de Terminale

On verra que l'on peut forcer une transformation chimique grâce à un générateur. Les **activités 1 et 2** permettent de visualiser une transformation forcée.

ACTIVITÉS

p. 188 ACTIVITÉ 1

Principe de l'électrolyse

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet aux élèves de visualiser les transformations d'un système chimique dans le sens direct et dans le sens opposé, et ainsi s'approprier le principe de l'électrolyse.

› Exploitation et analyse

1. a. La solution jaune-orangée devient bleue. Le diiode est consommé. Il y a formation d'ions cuivre Cu^{2+} (aq) de couleur bleue, donc le cuivre est en partie consommé.

b. $I_2\,(aq) + 2\,e^- = 2\,I^-\,(aq)$

$Cu\,(s) = Cu^{2+}\,(aq) + 2\,e^-$

$I_2\,(aq) + Cu\,(s) \rightleftarrows 2\,I^-(aq) + Cu^{2+}\,(aq)$

2. a. Le quotient de réaction à l'état initial est donné par :

$$Q_{r,i} = \frac{[Cu^{2+}]_i \cdot [I^-]_i^2}{[I_2]_i}$$

À l'état initial, les concentrations en quantité de matière d'ions iodure I^- (aq) et d'ions cuivre Cu^{2+} (aq) sont nulles, donc le quotient de réaction à l'état initial est nul : $Q_{r,i} = 0$.

b. $Q_{r,i} < K(T)$, donc le système évolue spontanément dans le sens direct de l'écriture de l'équation de la réaction.

3. a. On observe un dépôt métallique orangé sur l'électrode reliée à la borne négative du générateur montrant la formation de cuivre. La solution initialement bleue autour de l'autre électrode devient jaune-orangée, montrant la formation de diiode.

b. L'équation modélisant la transformation est :

$2\,I^-\,(aq) + Cu^{2+}\,(aq) \rightleftarrows I_2\,(aq) + Cu\,(s)$.

Le sens d'évolution de la transformation est inversé par rapport à l'expérience précédente.

› Synthèse

4. Pour inverser le sens d'une transformation chimique, il faut réaliser une électrolyse à l'aide d'un générateur de tension continue qui va fournir de l'énergie au système chimique.

p. 189 ACTIVITÉ 2

Le dihydrogène, une solution d'avenir

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet aux élèves de comprendre les différents enjeux économiques, politiques et environnementaux des projets autour de l'utilisation du dihydrogène comme source d'énergie. Dans la première partie de l'activité, les élèves voient comment est actuellement fabriqué le dihydrogène et quelles sont les nouvelles technologies et les projets qui voient le jour pour rendre cette production plus propre. Ils voient également les différents types de transfert d'énergie à l'œuvre dans ce type de chaîne de production. La deuxième partie de l'activité met les élèves en situation de produire du dihydrogène grâce à un électrolyseur, puis de l'utiliser dans une pile à combustible. Ils pourront ainsi comprendre le fonctionnement d'un électrolyseur et d'une pile à combustible. L'animation « La pile à combustible » décrit le fonctionnement d'une pile à combustible avec les transformations se produisant à chaque électrode, ainsi que le déplacement des électrons et des ions dans la pile.

Partie 1

› Exploitation et analyse

1. a $CH_4\,(g) + 2\,H_2O\,(g) \rightarrow 4\,H_2\,(g) + CO_2\,(g)$

b. $C\,(g) + 2\,H_2O\,(g) \rightarrow 2\,H_2\,(g) + CO_2\,(g)$

2. Le procédé est trop coûteux (doc. 1) et polluant (déchets nucléaires pour les centrales nucléaires et production de dioxyde de carbone pour les centrales thermiques, doc. 2).

3. • Panneaux solaires : conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

• Accumulateur lithium-ion : conversion de l'énergie électrique en énergie chimique lors de la recharge ; conversion de l'énergie chimique en énergie électrique lors du fonctionnement.

• Électrolyseur : conversion de l'énergie électrique en énergie chimique.

• Pile à combustible : conversion de l'énergie chimique en énergie électrique.

› Synthèse

4. Actuellement, on utilise essentiellement les hydrocarbures comme source d'énergie pour les transports et les énergies fossiles ou nucléaires pour la production d'électricité.

Les réserves en hydrocarbures et en uranium ne sont pas illimitées et ces énergies sont polluantes : production de dioxyde de carbone, qui est un gaz à effet de serre provoquant le réchauffement climatique ; émission de particules fines, dangereuses pour la santé, pour la combustion des diesels ; formation d'oxyde d'azote provoquant des pluies

acides et ayant des effets néfastes sur la santé ; production de déchets radioactifs. Nous devons donc nous tourner vers des énergies plus propres.
La pile à combustible semble être une piste envisageable si le dihydrogène qu'elle consomme est produit sans centrales thermiques ou nucléaires. L'utilisation d'énergies renouvelables (panneaux photovoltaïques ou éoliennes) pour alimenter un électrolyseur qui produirait du dihydrogène « propre » semble réalisable dans les années futures et permettrait à chacun d'être autonome en énergie simplement en disposant de panneaux photovoltaïques ou d'une éolienne, d'un électrolyseur, d'un réservoir pour le stockage du dihydrogène et d'une pile à combustible. De plus, cette technologie permettrait de stocker de l'énergie pour les jours où la demande serait plus forte, sans polluer pour autant.

Partie 2

› Expérience et exploitation

1. a et **b.** L'électrolyse a duré 5 minutes et 44 s, avec une intensité $I = 0{,}27$ A.

2. a. L'équation de la réaction se déroulant dans l'électrolyseur est :
$2\ H_2O\ (\ell) \rightleftarrows 2\ H_2\ (g) + O_2\ (g)$

b. On forme deux fois plus de dihydrogène que de dioxygène. Cela correspond à l'équation bilan pour laquelle :
$n(H_2) = 2\ n(O_2)$, donc : $V(H_2) = 2\ V(O_2)$.

c. La transformation se déroulant dans la pile à combustible est l'inverse de celle se produisant dans l'électrolyseur.

3. a. La quantité de charges électriques mise en jeu lors de l'électrolyse est :
$q = I \cdot \Delta t = 0{,}27 \times 344 = 93$ C.

b. La quantité d'électrons échangés est :

$$n(e^-) = \frac{q}{N_A \cdot e} = \frac{93}{6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}} = 9{,}7 \times 10^{-4}\ \text{mol}$$

c. D'après la demi-équation $2\ H^+\ (aq) + 2\ e^- = H_2\ (g)$, la quantité de matière de dihydrogène formée est :

$$n(H_2) = \frac{n(e^-)}{2} = 4{,}8 \times 10^{-4}\ \text{mol}$$

› Conclusion

4. Les électrons libérés par la borne négative du générateur sont captés par les ions hydrogène H^+ (aq) au niveau de l'électrode et se transforment en dihydrogène H_2 (g). Cette réduction est modélisée par la demi-équation :
$2\ H^+\ (aq) + 2\ e^- = H_2\ (g)$
Les électrons qui entrent par la borne positive du générateur sont libérés au niveau de l'électrode par les molécules d'eau pour se transformer en dioxygène O_2 (g). Cette oxydation est modélisée par la demi-équation :
$2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^-$
L'équation bilan de la transformation est ainsi :
$2\ H_2O\ (\ell) \rightleftarrows 2\ H_2\ (g) + O_2\ (g)$

EXERCICES

Vérifier l'essentiel p. 196

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le générateur doit délivrer une tension continue.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car une pile ne fournit pas un courant suffisant pour réaliser une électrolyse.
La proposition C est une bonne réponse.

2 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car les électrons circulent dans le circuit électrique.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car les atomes ne sont pas dans la solution.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car les ions circulent dans la solution.
La proposition B est une bonne réponse
La proposition C n'est pas une bonne réponse car les atomes ne se déplacent pas dans le circuit électrique.

4 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car l'anode est le siège d'une oxydation.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'anode attire les anions.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car on doit convertir l'intensité I en ampère et la durée Δt en seconde pour calculer la quantité de charges électriques en appliquant la formule $q = I \cdot \Delta t$.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car on doit convertir l'intensité I en ampère et la durée Δt en seconde pour calculer la quantité de charges électriques en appliquant la formule $q = I \cdot \Delta t$.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la quantité d'électrons échangés est donnée par la relation $n(e^-) = \dfrac{I \cdot \Delta t}{N_A \cdot e}$, avec l'intensité I en ampère et la durée Δt en seconde.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la quantité d'électrons échangés est donnée par la relation $n(e^-) = \dfrac{I \cdot \Delta t}{N_A \cdot e}$, avec l'intensité I en ampère et la durée Δt en seconde.
La proposition C est une bonne réponse.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, d'après la demi-équation :
$2\ H_2O\ (\ell) + 2\ e^- = H_2\ (g) + 2\ HO^-\ (aq)$,
1 mole de dihydrogène est formé quand 2 moles d'électrons ont été échangées.
La quantité de matière de dihydrogène est égale à la moitié de la quantité de matière d'électrons échangés.
La proposition B n'est pas une bonne réponse pour les mêmes raisons.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car une pile est le siège d'une réaction d'oxydoréduction.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car une pile est le siège d'une réaction d'oxydoréduction.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, lors de sa charge, un accumulateur reçoit de l'énergie électrique pour forcer une réaction chimique à se réaliser.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, lors de sa charge, un accumulateur reçoit de l'énergie électrique pour forcer une réaction chimique à se réaliser.

10 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, pour réaliser la photosynthèse, la plante a besoin de l'énergie lumineuse du Soleil.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, pour réaliser la photosynthèse, la plante a besoin de l'énergie lumineuse du Soleil.

Acquérir les bases *p. 197*

› 1. Transformations forcées

11 **1.** $I_2\ (aq) + 2\ S_2O_3^{2-}\ (aq) \rightleftarrows 2\ I^-\ (aq) + S_4O_6^{2-}\ (aq)$

2. À l'électrode reliée à la borne – du générateur, on a deux réductions possibles :
$S_4O_6^{2-}\ (aq) + 2\ e^- = 2\ S_2O_3^{2-}\ (aq)$
ou $2\ H_2O\ (\ell) + 2\ e^- = H_2\ (g) + 2\ HO^-\ (aq)$.
À l'électrode reliée à la borne + du générateur, on a deux oxydations possibles :
$2\ I^-\ (aq) = I_2\ (aq) + 2\ e^-$
ou $2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^-$
Il y a formation de bulles de gaz à une électrode et apparition d'une couleur jaune-orangée à l'autre, donc la réaction se produisant à l'électrode reliée à la borne – du générateur est :
$2\ H_2O\ (\ell) + 2\ e^- = H_2\ (g) + 2\ HO^-\ (aq)$ et celle qui se réalise à l'électrode reliée à la borne + du générateur est : $2\ I^-\ (aq) = I_2\ (aq) + 2\ e^-$.

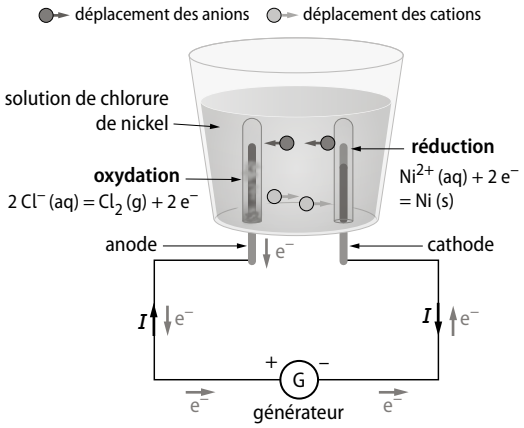
3. Un générateur de tension continue peut forcer un système chimique à évoluer dans le sens opposé à son sens d'évolution spontanée

12 **1.** La coloration bleue correspond à la formation d'ions cuivre $Cu^{2+}\ (aq)$, le métal gris est de l'argent Ag (s). C'est la réaction **1** qui se produit.

2. a. Le générateur permet de forcer la réaction chimique dans le sens inverse de la transformation spontanée. La réaction correspond donc à l'équilibre **2** :
$Cu^{2+}\ (aq) + 2\ Ag\ (s) \rightleftarrows Cu\ (s) + 2\ Ag^+\ (aq)$
b. La solution va se décolorer et on aura la formation d'un dépôt métallique orangé de cuivre sur la cathode (électrode reliée à la borne – du générateur).

› 2. L'électrolyseur

13 **1.** À la cathode, on a une réduction :
$Ni^{2+}\ (aq) + 2\ e^- = Ni\ (s)$;
et à l'anode, une oxydation :
$2\ Cl^-\ (aq) = Cl_2\ (g) + 2\ e^-$.
L'équation de la transformation est :
$Ni^{2+}\ (aq) + 2\ Cl^-\ (aq) \rightleftarrows Ni\ (s) + Cl_2\ (g)$
2.



14 **1.** Le courant électrique circule de la borne + du générateur, rentre par la borne mA de l'ampèremètre jusqu'à la borne – du générateur. Les électrons circulent donc dans le sens inverse.

2. Dans la solution, on a des ions potassium $K^+\ (aq)$, des ions iodure $I^-\ (aq)$ et de l'eau H_2O.
a. La borne – du générateur est reliée à la cathode, qui est le siège d'une réduction, donc on peut avoir les réactions :
$K^+\ (aq) + e^- = K\ (s)$
ou $2\ H_2O\ (\ell) + 2\ e^- = H_2\ (g) + 2\ OH^-\ (aq)$.
b. La borne + du générateur est reliée à l'anode, qui est le siège d'une oxydation, donc on peut avoir les réactions :
$2\ I^-\ (aq) = I_2\ (aq) + 2\ e^-$
ou $2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^-$.

3. Il y a un dégagement de gaz à la cathode, donc formation de dihydrogène selon la demi-équation : $2\ H_2O\ (\ell) + 2\ e^- = H_2\ (g) + 2\ OH^-\ (aq)$.
Il n'y a pas de dégagement de gaz à l'anode, donc pas de dioxygène formé. On forme du diiode selon la demi-équation :
$2\ I^-\ (aq) = I_2\ (aq) + 2\ e^-$.

15 **1.** Du métal peut se former sur la bague qui sert d'électrode. On veut former de l'or, qui est le réducteur du couple Au^{3+} (aq) / Au (s). Lors d'une électrolyse, la cathode est le siège d'une réduction, donc il faut mettre la bague comme cathode.

2. On a $Au^{3+}\ (aq) + 3\ e^- = Au\ (s)$. C'est une réduction.

3. a. La quantité de matière d'or à déposer sur la bague est :

$$n(Au) = \frac{m}{M} = \frac{59 \times 10^{-6}}{197} = 3{,}0 \times 10^{-7}\ \text{mol}$$

b. D'après la demi-équation, la quantité de matière d'électrons échangés est :

$$n(e^-) = 3\ n(Au) = 3 \times 3{,}0 \times 10^{-7} = 9{,}0 \times 10^{-7}\ \text{mol}$$

c. On utilise les formules de la quantité de charges électriques échangées :
$q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$
On peut isoler la durée Δt de l'électrolyse :

$$\Delta t = \frac{n(e^-) \cdot N_A \cdot e}{I} = \frac{9{,}0 \times 10^{-7} \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}{0{,}020} = 4{,}3\ \text{s}$$

16 **1.** En utilisant le couple oxydant-réducteur $Cl_2\ (g) / Cl^-\ (aq)$, on peut écrire la demi-équation :
$2\ Cl^-\ (aq) = Cl_2\ (g) + 2\ e^-$
Cette transformation est une oxydation, donc elle se produit à l'anode.

2. Les données de l'exercice sont :
– l'intensité $I = 45\ kA = 45 \times 10^3\ A$;
– la durée de l'électrolyse $\Delta t = 24\ h$ qu'il faut convertir en seconde : $\Delta t = 24 \times 3\,600$ s.
Donc on utilise la formule de la quantité de charges électriques échangées : $q = I \cdot \Delta t$.
AN : $q = 45 \times 10^3 \times 24 \times 3\,600$ soit $q = 3{,}9 \times 10^9$ C.

3. On utilise la formule de la quantité de charges électriques échangées : $q = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$, donc :

$$n(e^-) = \frac{q}{N_A \cdot e}.$$

AN : $n(e^-) = \dfrac{3{,}9 \times 10^9}{6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}} = 4{,}0 \times 10^4$ mol.

4. D'après la demi-équation $2\ Cl^-\ (aq) = Cl_2\ (g) + 2\ e^-$, 1 mole de dichlore est formée quand 2 moles d'électrons ont été échangées.
La quantité de matière de dichlore est égale à la moitié de la quantité de matière d'électrons échangés : $n(Cl_2) = \dfrac{n(e^-)}{2} = 2{,}0 \times 10^4$ mol.

5. Le dichlore étant un gaz, la quantité de matière de dichlore est donnée par la formule :

$$n(Cl_2) = \frac{V(Cl_2)}{V_m}$$

Donc : $V(Cl_2) = n(Cl_2) \cdot V_m = 2{,}0 \times 10^4 \times 24$ soit :
$V(Cl_2) = 4{,}8 \times 10^5\ L = 4{,}8 \times 10^2\ m^3$.

› 3. Stockage et conversion d'énergie chimique

17 **1.** La pile à combustible convertit l'énergie chimique en énergie électrique.

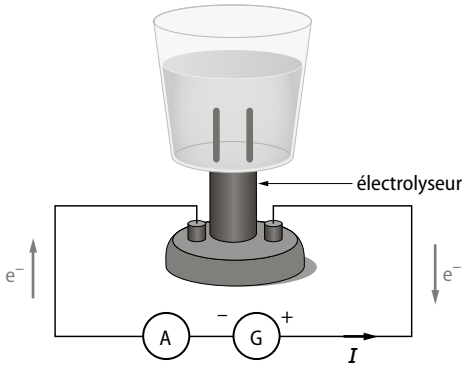
2. Les panneaux photovoltaïques permettent d'avoir de l'électricité durant une journée ensoleillée. Le surplus d'énergie électrique dans la journée a permis de fabriquer du dihydrogène grâce à l'électrolyseur que l'on stocke dans une citerne selon l'équation :
$2\ H_2O\ (\ell) \rightleftarrows 2\ H_2\ (g) + O_2\ (g)$
Quand il ne fait pas beau, ou bien la nuit, la pile à combustible alimentée par le dihydrogène stocké permet d'avoir de l'électricité en utilisant le dioxygène de l'air et en ne libérant que de l'eau selon l'équation :
$2\ H_2\ (g) + O_2\ (g) \rightleftarrows 2\ H_2O\ (\ell)$

3. Ce dispositif permet d'être autonome en énergie sans polluer.

Faire le point avant d'aller plus loin *p. 198*

◗ ***Comment peut-on forcer une réaction chimique ?***
Pour forcer une réaction chimique, on utilise un générateur délivrant une tension continue, relié à un électrolyseur.

◗ ***Schématiser le dispositif expérimental d'une électrolyse***.



◗ ***Quels sont les enjeux sociétaux associés aux dispositifs de conversion et de stockage d'énergie ?***
La diminution des réserves d'hydrocarbures, l'offre grandissante des appareils nomades, les problèmes liés à la pollution et au réchauffement climatique.

◗ ***Quelle transformation se produit à la cathode lors d'une électrolyse ? et à l'anode ?***
La cathode est le siège d'une réduction, l'anode est le siège d'une oxydation.

◗ ***Citer des exemples de dispositifs de conversion et stockage d'énergie chimique.***
Les piles, les accumulateurs (aussi appelés batteries), les organismes chlorophylliens.

◗ ***Comment peut-on calculer la quantité de charges électriques mise en jeu lors d'une électrolyse ?***
La quantité de charges électriques échangées lors d'une électrolyse est reliée à l'intensité I du courant électrique et à la durée Δt de l'électrolyse par la relation : $q = I \cdot \Delta t$,
avec q en coulomb, I en ampère et Δt en seconde.
La quantité de charges électriques échangées lors d'une électrolyse est reliée à la quantité d'électrons échangés par la relation : $q = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$,
avec $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1} et $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

◗ ***Quelle est la relation entre les différentes quantités de matière dans cette demi-équation ?***
Cu (s) = Cu^{2+} (aq) + 2 e^-
D'après la demi-équation, 1 mole de cuivre donne 1 mole d'ions cuivre Cu^{2+} (aq) et 2 moles d'électrons ont été échangées.
La quantité de matière de cuivre est égale à la quantité de matière d'ions cuivre et à la moitié de la quantité de matière d'électrons échangés. On peut donc écrire :

$$n(Cu) = n(Cu^{2+}) = \frac{1}{2} \times n(e^-).$$

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 199 et 200

19 **1.** Le titane est réduit, donc il se trouve à la cathode qui est le siège d'une réduction.

2. Les données de l'exercice sont :
− l'intensité $I = 200$ mA $= 0{,}200$ A ;
− la durée de l'électrolyse $\Delta t = 1$ h qu'il faut convertir en seconde : $\Delta t = 1 \times 3\,600 = 3\,600$ s.

Donc on utilise les formules de la quantité de charges électriques échangées :
$q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
On peut isoler la quantité de matière d'électrons échangés : $n(e^-) = \dfrac{I \cdot \Delta t}{N_A \cdot e}$.

AN : $n(e^-) = \dfrac{0{,}200 \times 3\,600}{6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$
soit $n(e^-) = 7{,}5 \times 10^{-3}$ mol.

3. Les données de l'exercice sont la masse de titane $m = 179$ mg $= 0{,}179$ g et la masse molaire atomique du titane $M = 47{,}9$ g · mol^{-1}, donc la quantité de matière de titane formé est :

$$n(Ti) = \frac{m}{M} = \frac{0{,}179}{47{,}9} \text{ soit } n(Ti) = 3{,}7 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

4. En utilisant le couple oxydant-réducteur donné : $Ti^{\alpha+}$ (aq)/Ti (s), on peut écrire la demi-équation modélisant la formation du titane :
$Ti^{\alpha+}$ (aq) + α e^- = Ti (s)
D'après cette demi-équation, on a : $n(e^-) = \alpha \times n(Ti)$,

donc $\alpha = \dfrac{n(e^-)}{n(Ti)} = \dfrac{7{,}5 \times 10^{-3}}{3{,}7 \times 10^{-3}}$ soit $\alpha = 2$.

La formule des ions titane est : Ti^{2+} (aq).

21 **1. a.** On souhaite former du dihydrogène au niveau du canon qui est le réducteur du couple H_2O (ℓ) / H_2 (g). Le canon est le siège d'une réduction, donc l'objet sert de cathode lors de l'électrolyse.
b. La demi-équation se produisant au niveau de l'objet est donc :
2 H_2O (ℓ) + 2 e^- = H_2 (g) + 2 HO^- (aq)

2. Les données de l'exercice sont :
− l'intensité $I = 80$ mA $= 0{,}080$ A ;
− la durée de l'électrolyse $\Delta t = 36$ h qu'il faut convertir en seconde : $\Delta t = 36 \times 3\,600$ s.
Donc on utilise les formules de la quantité de charges électriques échangées :
$q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
On peut isoler la quantité de matière d'électrons échangés : $n(e^-) = \dfrac{I \cdot \Delta t}{N_A \cdot e}$.

AN : $n(e^-) = \dfrac{80 \times 10^{-3} \times 36 \times 3\,600}{6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$
soit $n(e^-) = 0{,}11$ mol.

3. D'après la demi-équation, 1 mole de dihydrogène est formée quand 2 moles d'électrons ont été échangées. La quantité de matière de dihydrogène formé est égale à la moitié de la quantité de matière d'électrons échangés, on a : $n(H_2) = \dfrac{n(e^-)}{2} = \dfrac{0{,}11}{2}$ soit $n(H_2) = 5{,}5 \times 10^{-2}$ mol.
Le volume de dihydrogène formé est :
$V(H_2) = n(H_2) \cdot V_m = 5{,}5 \times 10^{-2} \times 24$ soit $V(H_2) = 1{,}3$ L.

S'entraîner pour maîtriser

p. 201

22 **1.** Pour calculer la concentration initiale de chaque ion dans le mélange, il faut d'abord calculer la quantité de matière initiale de chaque ion dans leur solution initiale :

$n_i(Cu^{2+}) = c_1 \cdot V_1 = 0{,}10 \times 50 \times 10^{-3}$
soit $c_1 = 5{,}0 \times 10^{-3}$ mol ;
$n_i(Zn^{2+}) = c_2 \cdot V_2 = 0{,}10 \times 50 \times 10^{-3}$
soit $c_2 = 5{,}0 \times 10^{-3}$ mol.
Puis, on détermine la concentration initiale pour chaque ion avec le volume total :
$V_T = V_1 + V_2 = 0{,}100$ L. Ainsi :

$$[Cu^{2+}]_i = \frac{n_i(Cu^{2+})}{V_T} = \frac{5{,}0 \times 10^{-3}}{0{,}100} = 5{,}0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} ;$$

$$[Zn^{2+}]_i = \frac{n_i(Zn^{2+})}{V_T} = \frac{5{,}0 \times 10^{-3}}{0{,}100} = 5{,}0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

D'après l'équation bilan, on peut déterminer le quotient de réaction : $Q_{r,i} = \frac{[Zn^{2+}]_i}{[Cu^{2+}]_i} = 1$.

$Q_{r,i} < K(T)$, donc l'évolution du système se fait dans le sens direct de l'équation donnée.

2. Si l'on force la transformation grâce à un générateur, elle se fera dans le sens opposé de l'équation donnée, donc on formera du zinc.

3. Les données de l'exercice sont :
– l'intensité $I = 200$ mA $= 0{,}200$ A ;
– la durée de l'électrolyse $\Delta t = 30$ min qu'il faut convertir en seconde : $\Delta t = 30 \times 60$ s.
Donc on utilise la formule de la quantité de charges électriques échangées : $q = I \cdot \Delta t$.
AN : $q = 0{,}200 \times 30 \times 60 = 3{,}6 \times 10^2$ C.

4. D'après la demi-équation modélisant la transformation des ions zinc :
Zn^{2+} (aq) + 2 e^- = Zn (s)
1 mole de zinc est formée quand 2 moles d'électrons ont été échangées.
La quantité de matière de zinc formé est égale à la moitié de la quantité de matière d'électrons échangés, on a : $n(Zn) = \frac{1}{2} \times n(e^-)$.
On utilise la formule de la quantité de charges électriques échangées : $q = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
On peut isoler la quantité de matière d'électrons échangés : $n(e^-) = \frac{q}{N_A \cdot e}$.

$n(Zn) = \frac{1}{2} \times n(e^-)$ donc $n(Zn) = \frac{q}{2 \times N_A \cdot e}$.

AN : $n(Zn) = \frac{3{,}6 \times 10^2}{2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$
soit $n(Zn) = 1{,}9 \times 10^{-3}$ mol.
La masse de zinc formé est :
$m(Zn) = n(Zn) \cdot M_{Zn} = 1{,}9 \times 10^{-3} \times 65{,}4 = 0{,}12$ g.

23 **1.** C'est la crise pétrolière, qui a causé une pénurie de pétrole et fait augmenter fortement son prix.

2. Il a permis de réduire considérablement la taille des accumulateurs des appareils nomades. De plus, on peut associer un nombre de cellules très différent selon l'appareil à alimenter : quelques cellules pour un téléphone, des centaines pour un véhicule électrique.

3. Il est léger, contrairement à un accumulateur au plomb, résistant et peut être chargé un grand nombre de fois sans être détérioré. Cela permet de développer les appareils nomades en offrant une grande mobilité.

24 **1.** Cette pile ne rejette que de l'eau, donc elle ne pollue pas.

2. L'électrode 1 est le siège d'une oxydation avec le couple H^+ (aq) / H_2 (g), donc on a la demi-équation :
H_2 (g) = 2 H^+ (aq) + 2 e^-
L'électrode 2 est le siège d'une réduction avec le couple O_2 (g) / H_2O (ℓ), donc on a la demi-équation :
O_2 (g) + 4 H^+ (aq) + 4 e^- = 2 H_2O (ℓ)

3. On souhaite une relation entre les quantités de matière de dihydrogène et d'électrons échangés, donc on utilise la demi-équation se réalisant à l'électrode 1.
D'après cette demi-équation, 1 mole de dihydrogène est consommée quand 2 moles d'électrons ont été échangées. La quantité de matière d'électrons échangés est égale au double de la quantité de matière de dihydrogène consommé :
$n(e^-) = 2 \times n_i(H_2)$.

4. Le dioxygène provient de l'air, qui est en quantité illimitée.

5. On utilise les formules de la quantité de charges électriques échangées : $q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
On peut isoler la quantité de matière d'électrons échangés : $n(e^-) = \frac{I \cdot \Delta t}{N_A \cdot e}$.

On a : $n_i(H_2) = \frac{1}{2} \times n(e^-) = \frac{I \cdot \Delta t}{2 N_A \cdot e}$.

6. $n_i(H_2) = \frac{I \cdot \Delta t}{2 N_A \cdot e}$ et on doit convertir la durée Δt en seconde.

AN : $n_i(H_2) = \frac{200 \times 200 \times 3\,600}{2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$

soit $n_i(H_2) = 7{,}5 \times 10^2$ mol.
Le volume de dihydrogène consommé est :
$V(H_2) = n_i(H_2) \cdot V_m = 7{,}5 \times 10^2 \times 24$ soit $V(H_2) = 1{,}8 \times 10^4$ L.

7. Dans les conditions usuelles de température et de pression, le volume de dihydrogène nécessaire est très grand : il faudrait un énorme réservoir pour le stocker.

25 **› Démarche experte**

• On détermine le volume journalier de dioxygène consommé par un astronaute pour respirer.

Chaque minute, les poumons d'un astronaute ont besoin de 0,30 L de dioxygène.
En une journée, c'est-à-dire en 24 heures (1 h est composée de 60 min), le volume de dioxygène consommé par un astronaute pour respirer est :
$V(O_2) = 0{,}30 \times 24 \times 60 = 432$ L.
• La quantité de matière journalière de dioxygène consommé par un astronaute pour respirer est :

$$n(O_2) = \frac{V}{V_m} = \frac{432}{25} = 17{,}3 \text{ mol}$$

• En utilisant le couple faisant intervenir l'eau et le dioxygène, on peut écrire la demi-équation :
$2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^-$
D'après cette demi-équation, 1 mole de dioxygène est produite quand 4 moles d'électrons ont été échangées. La quantité de matière d'électrons échangés est 4 fois plus importante que la quantité de matière de dioxygène produit, donc :
$n(e^-) = 4 \times n(O_2) = 4 \times 17{,}3$ soit $n(e^-) = 69{,}2$ mol.
• On utilise les formules de la quantité de charges électriques échangées : $q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
On peut isoler l'intensité délivrée par l'électrolyseur :

$$I = \frac{n(e^-) \cdot N_A \cdot e}{\Delta t}.$$

AN : $I = \dfrac{69{,}2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}{24 \times 3\,600} = 77$ A.

› Démarche avancée

1. Sur Mars, les astronautes souhaitent transformer l'eau en dioxygène et dihydrogène.
Pour le couple $O_2\ (g)$ / $H_2O\ (\ell)$, on a une oxydation selon :
$2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^-$
Pour le couple $H_2O\ (\ell)$ / $H_2\ (g)$, on a une réduction selon : $2\ H_2O\ (\ell) + 2\ e^- = H_2\ (g) + 2\ HO^-\ (aq)$
En additionnant les deux demi-équations après avoir multiplié par 2 la seconde demi-équation (pour éliminer les électrons) :

$$\begin{aligned} &2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^- \\ &+ \mathbf{(}2\ H_2O\ (\ell) + 2\ e^- = H_2\ (g) + 2\ HO^-\ (aq)\mathbf{)} \times \mathbf{2} \\ \hline &2\ H_2O\ (\ell) + \mathbf{4}\ H_2O\ (\ell) + \mathbf{4}\ e^- \\ &= O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^- + \mathbf{2}\ H_2\ (g) + \mathbf{4}\ HO^-\ (aq) \end{aligned}$$

On obtient après simplification l'équation bilan :
$2\ H_2O\ (\ell) \rightleftarrows O_2\ (g) + 2\ H_2\ (g)$

2. Chaque minute, les poumons d'un astronaute ont besoin de 0,30 L de dioxygène.
En une journée, c'est-à-dire en 24 heures (1 h est composée de 60 min), le volume de dioxygène consommé par un astronaute pour respirer est : $V(O_2) = 0{,}30 \times 24 \times 60 = 432$ L, ce qui correspond à une quantité de matière de dioxygène :

$$n(O_2) = \frac{V}{V_m} = \frac{432}{25} = 17{,}3 \text{ mol par jour}$$

3. D'après la demi-équation écrite à la question 1, 1 mole de dioxygène est produite quand 4 moles d'électrons ont été échangées. La quantité de matière d'électrons échangés est 4 fois plus importante que la quantité de matière de dioxygène produit, donc :
$n(e^-) = 4 \times n(O_2) = 4 \times 17{,}3$ soit $n(e^-) = 69{,}2$ mol.
4. On utilise la formule de la quantité de charges électriques échangées : $q = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
AN : $q = 69{,}2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19} = 6{,}7 \times 10^6$ C.
5. On utilise la formule de la quantité de charges électriques échangées : $q = I \cdot \Delta t$, avec I en ampère et Δt en seconde. Donc : $I = \dfrac{q}{\Delta t}$.
AN : $I = \dfrac{6{,}7 \times 10^6}{24 \times 3\,600}$ soit $I = 77$ A.

26 *Fabrication du cadmium*

Le cadmium est un métal utilisé dans certains accumulateurs. On l'obtient de façon industrielle par électrolyse d'une solution aqueuse de sulfate de cadmium (Cd^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) mélangée avec de l'acide sulfurique (2 H^+ (aq), SO_4^{2-} (aq)).
L'intensité du courant, gardée constante pendant l'électrolyse, est de 25,0 kA.

Données :
• *Couples oxydant-réducteur :*
Cd^{2+} (aq) / Cd (s) ; H^+ (aq) / H_2 (g) ; O_2 (g) / H_2O (ℓ) ;
$S_2O_8^{2-}$ (aq) / SO_4^{2-} (aq) ; SO_4^{2-} (aq) / SO_2 (g).
• *Volume molaire dans les conditions de l'expérience : $V_m = 24$ L · mol^{-1}.*
• *Masse molaire du cadmium : 112,4 g · mol^{-1}.*

1. *Écrire toutes les demi-équations électroniques pouvant se produire à chaque électrode.*
2. *Pendant l'électrolyse, un dépôt métallique se forme à la cathode et un gaz se forme à l'anode. Quels sont les produits formés ? Écrire l'équation de la réaction qui a lieu.*
3. *Quelle est la masse de métal formée en 24 heures ?*
4. *Déterminer le volume de gaz formé à l'anode pendant cette même durée.*

1. À la cathode, on a une réduction donc :
– soit : $Cd^{2+}\ (aq) + 2\ e^- = Cd\ (s)$;
– soit : $2\ H^+\ (aq) + 2\ e^- = H_2\ (g)$;
– soit : $SO_4^{2-}\ (aq) + 4\ H^+\ (aq) + 2\ e^- = SO_2\ (g) + 2\ H_2O\ (\ell)$.
À l'anode, on a une oxydation donc :
– soit : $2\ SO_4^{2-}\ (aq) = S_2O_8^{2-}\ (aq) + 2\ e^-$;
– soit : $2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^-$.

2. Il se forme un métal à la cathode : c'est du cadmium. Il se forme un gaz à l'anode : c'est donc du dioxygène. Les demi-équations se produisant sont :
$\mathbf{(}Cd^{2+}\ (aq) + 2\ e^- = Cd\ (s)\mathbf{)} \times \mathbf{2}$
$2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^-$

L'équation de la réaction est donc :
$2\ Cd^{2+}\ (aq) + 2\ H_2O\ (\ell) \rightleftarrows 2\ Cd\ (s) + O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq)$

3. On utilise les formules de la quantité de charges électriques échangées :
$q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
On peut isoler la quantité de matière d'électrons échangés :
$$n(e^-) = \frac{I \cdot \Delta t}{N_A \cdot e}.$$
D'après la demi-équation $Cd^{2+}\ (aq) + 2\ e^- = Cd\ (s)$, on peut écrire :
$$n(Cd) = \frac{n(e^-)}{2} = \frac{I \cdot \Delta t}{2\ N_A \cdot e}$$
La masse de cadmium formée en 24 h est :
$$m(Cd) = n(Cd) \cdot M(Cd) = \frac{I \cdot \Delta t \cdot M_{Cd}}{2\ N_A \cdot e}$$
$$= \frac{25{,}0 \times 10^3 \times 24 \times 3\,600 \times 112{,}4}{2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$$
$$= 1{,}3 \times 10^6\ g = 1{,}3\ t$$

4. D'après la demi-équation :
$2\ H_2O\ (\ell) = O_2\ (g) + 4\ H^+\ (aq) + 4\ e^-$, on peut écrire :
$$n(O_2) = \frac{n(e^-)}{4} = \frac{I \cdot \Delta t}{4\ N_A \cdot e}$$
Le volume de dioxygène formé en 24 h est donc :
$$V(O_2) = n(O_2) \cdot V_m = \frac{I \cdot \Delta t \cdot V_m}{4\ N_A \cdot e}$$
$$= \frac{25{,}0 \times 10^3 \times 24 \times 3\,600 \times 24}{4 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$$
$$= 1{,}3 \times 10^5\ L$$

27 **1.** La boîte de conserve est un cylindre ayant une base de rayon R et de hauteur h.
La surface d'un cylindre est :
$S_{cylindre} = 2 \times S_{disque} + S_{partie\ latérale\ du\ cylindre}$
$= 2\ (\pi\ R^2) + 2\pi \cdot R \cdot h$.
Le diamètre étant de 73 mm, son rayon est :
$$R = \frac{73}{2} = 37\ mm.$$
$S_{cylindre} = 2 \times \pi \times 0{,}037^2 + 2 \times \pi \times 0{,}037 \times 0{,}109$
$S_{cylindre} = 3{,}4 \times 10^{-2}\ m^2$.
On doit étamer la surface intérieure et extérieure de la boîte de conserve, donc :
S(totale à étamer) = S(intérieure) + S(extérieure)
$= 2 \times 3{,}4 \times 10^{-2} = 6{,}8 \times 10^{-2}\ m^2$.
La boîte de conserve doit être recouverte de 0,50 g d'étain par mètre carré, donc la masse d'étain à déposer est : $m(Sn) = 6{,}8 \times 10^{-2} \times 0{,}50 = 3{,}4 \times 10^{-2}$ g .
La quantité de matière d'étain déposé est :
$$n(Sn) = \frac{m(Sn)}{M(Sn)} = \frac{3{,}4 \times 10^{-2}}{118{,}7} = 2{,}9 \times 10^{-4}\ mol.$$

2. Sur une des électrodes, les ions étain Sn^{2+} (aq) se transforment en étain Sn (s) selon la demi-équation :
$Sn^{2+}\ (aq) + 2\ e^- = Sn\ (s)$
D'après la demi-équation, 1 mole d'étain est formée quand 2 moles d'électrons ont été échangées. La quantité de matière d'électrons échangés est égale au double de la quantité de matière d'étain formé, on a : $n(e^-) = 2 \times n(Sn)$ soit $n(e^-) = 5{,}8 \times 10^{-4}$ mol.
On utilise les formules de la quantité de charges électriques échangées : $q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
On peut isoler la durée Δt de l'électrolyse :
$$\Delta t = \frac{n(e^-) \cdot N_A \cdot e}{I}.$$
AN : $$\Delta t = \frac{5{,}8 \times 10^{-4} \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}{6{,}0}$$
soit $\Delta t = 9{,}3$ s.

28 **1.** On a le programme suivant

```
if a== 'deltat':
  b=float(input(«intensité du courant électrique I(A) = »))
  c=float(input(«quantité de matière d'électrons (en mol) n(e) = »))
  q=NA*e*c
  d=NA*e*c/b
  print(«Quantité de charges électriques (en C) q = », round(Q,4), « C»)
  print(«Durée de fonctionnement deltat = %.3e»%d , « s»)
```

2. On convertit Δt en seconde :
$\Delta t = 5{,}0 \times 60 = 3{,}0 \times 10^2$ s et $I = 2{,}0$ A, donc :
a. quantité de charges électriques échangées :
$Q = 600{,}0$ C
b. quantité de matière d'électrons échangés :
$n(e^-) = 6{,}219 \times 10^{-3}$ mol

29 **Exemple d'exposé oral**
En raison des prévisions assez pessimistes sur le réchauffement climatique et la surproduction de **gaz à effet de serre** comme le dioxyde de carbone, il faudrait réduire notre consommation d'énergie ou produire de l'énergie « propre ». Actuellement, en France, 72 % de l'énergie est nucléaire, donc ne produit pas de gaz à effet de serre, mais on se retrouve avec des déchets nucléaires potentiellement dangereux. De nombreux pays utilisent des centrales thermiques au charbon, au pétrole ou au gaz, libérant de grandes quantités de dioxyde de carbone. Les transports occasionnent aussi une grande production de dioxyde de carbone.
Une des solutions envisageables dans les années à venir serait d'équiper son habitation avec des **panneaux photovoltaïques** ou avec une **éolienne**. Cela permettrait d'avoir de l'énergie électrique

« propre » pour alimenter les différents appareils de la maison. Si les dispositifs produisent trop d'énergie par rapport à notre consommation, il faudrait les coupler avec :
– une **batterie lithium-ion**, qui se chargerait pour une utilisation de l'électricité stockée pendant la nuit ou le lendemain en cas de mauvais temps ;
– un **électrolyseur**, qui permettrait de transformer de l'eau en **dihydrogène** et dioxygène. Le dioxygène serait rejeté dans l'air et le dihydrogène pourrait être **stocké** dans une cuve pendant plusieurs mois. Si l'on a besoin d'énergie, le dihydrogène permettrait d'alimenter une **pile à combustible** qui fournirait de l'électricité en ne rejetant que de l'eau (**conversion d'énergie** chimique en énergie électrique).

On serait ainsi autonome en énergie et on n'utiliserait que des énergies renouvelables ou des énergies non polluantes.

30 Exemple d'exposé oral

La pollution due aux transports correspond à 25 % des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pour les réduire, les constructeurs de voiture se tournent vers d'autres types de motorisation :

• Les voitures électriques : un moteur électrique est alimenté par des accumulateurs lithium-ion que l'on peut recharger chez soi. Cette méthode n'est pas totalement « propre » car l'énergie électrique consommée pour recharger l'accumulateur peut provenir d'une centrale thermique qui libère du dioxyde de carbone ou d'une centrale nucléaire, qui occasionne des déchets radioactifs.

• Les voitures à pile à combustible : le dihydrogène H_2 (g) contenu dans le réservoir alimente une pile à combustible qui le transforme avec le dioxygène de l'air en eau selon la réaction :

$2\ H_2\ (g) + O_2\ (g) = 2\ H_2O\ (\ell)$ en libérant des électrons qui alimentent un moteur électrique. Cette technique est « propre » si le dihydrogène est fabriqué avec un électrolyseur alimenté par des panneaux photovoltaïques ou une éolienne. Sinon, les autres méthodes produisent aussi du dioxyde de carbone.

Si l'on veut réduire la production de gaz à effet de serre avec les transports, il faudrait développer le covoiturage ou les transports en commun. Ainsi, on réduirait l'utilisation des moteurs thermiques pour le transport d'une ou deux personnes dans un véhicule pouvant en contenir cinq ou plus. Cela réduirait les embouteillages, qui augmentent aussi la consommation de carburants et la production de gaz à effet de serre.

De plus, pour les courts trajets, se déplacer à pied ou à vélo permettrait aussi d'améliorer notre santé.

Développer ses compétences p. 204

31 › Analyse

1. L'équation de combustion complète de l'octane est :

$2\ C_8H_{18}\ (\ell) + 25\ O_2\ (g) \rightarrow 16\ CO_2\ (g) + 18\ H_2O\ (\ell)$

2. La quantité de matière d'octane consommée par une voiture pour parcourir 100 km est :

$$n(\text{octane}) = \frac{m(\text{octane})}{M(\text{octane})} = \frac{\rho \cdot V}{M(\text{octane})}$$
$$= \frac{810 \times 6{,}0}{8 \times 12 + 18 \times 1{,}0} = 43 \text{ mol}$$

D'après l'équation bilan :

$n(CO_2) = 8 \times n(\text{octane}) = 8 \times 43 = 3{,}4 \times 10^2$ mol.

Le volume de dioxyde de carbone émis par la voiture après 100 km est :

$V(CO_2) = n(CO_2) \cdot V_m = 3{,}4 \times 10^2 \times 24$
$= 8{,}2 \times 10^3\ L = 8{,}2\ m^3$.

3. Un véhicule utilise en moyenne 1 kg de dihydrogène pour parcourir 100 km. Pour que la totalité du parc automobile français parcoure 100 km avec une voiture fonctionnant au dihydrogène, il faudrait 39,5 millions de kilogrammes de dihydrogène.

4. Quantité de matière de dihydrogène consommé par une voiture pour parcourir 100 km :

$$n(H_2) = \frac{m(H_2)}{M(H_2)} = \frac{1\,000}{2} = 5{,}0 \times 10^2 \text{ mol.}$$

D'après l'équation :

$CH_4\ (g) + 2\ H_2O\ (\ell) \rightarrow 4\ H_2\ (g) + CO_2\ (g)$, on a :

$$n(CO_2) = \frac{n(H_2)}{4} = \frac{500}{4} = 1{,}3 \times 10^2 \text{ mol.}$$

Le volume de dioxyde de carbone libéré par vaporeformage pour produire 1 kg de dihydrogène est :

$V(CO_2) = n(CO_2) \cdot V_m$
$= 1{,}3 \times 10^2 \times 24 = 3{,}1 \times 10^3\ L$
$= 3{,}1\ m^3$

› Synthèse

On constate qu'une voiture fonctionnant grâce au dihydrogène produit par vaporeformage libère environ trois fois moins de dioxyde de carbone qu'une voiture classique. Elle est donc moins polluante si l'on ne tient pas compte de la façon dont est produite l'énergie qui permet de réaliser la réaction de vaporeformage. Si le dihydrogène était formé par un électrolyseur alimenté par des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques, cela permettrait d'avoir du dihydrogène « propre » et ainsi aucune production de dioxyde de carbone.

Mais la production mondiale de dihydrogène est beaucoup trop faible pour pouvoir alimenter un très grand nombre de véhicules fonctionnant au dihydrogène. Actuellement, le dihydrogène produit sert essentiellement en chimie pour des synthèses

industrielles comme la synthèse de l'ammoniac (environ 80 % de l'utilisation du dihydrogène) pour les engrais.

32 › Analyse

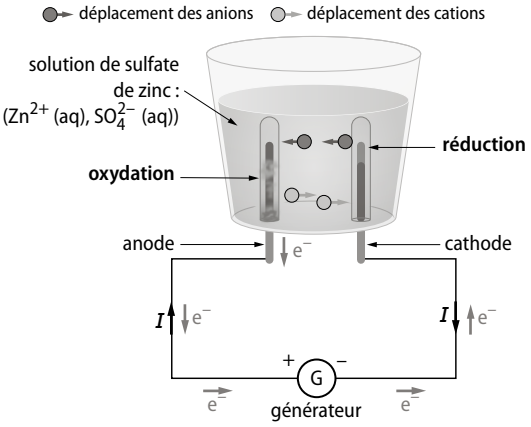
1. D'après le document 2**,** le compteur électrique est constitué d'une cuve contenant deux électrodes de zinc trempant dans une solution de sulfate de zinc : Zn^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq).

Lors d'une électrolyse, l'anode, reliée à la borne + du générateur est le siège d'une oxydation et la cathode, reliée à la borne – du générateur, est le siège d'une réduction.

L'oxydation à l'anode produit des électrons qui circulent dans le fil électrique jusqu'à la cathode.

Les ions se déplacent dans la solution, les anions allant vers l'anode et les cations vers la cathode.

On peut réaliser ce schéma :



2. D'après le document 3, le couple oxydant-réducteur du zinc est : Zn^{2+} (aq) / Zn (s).

L'anode est le siège d'une oxydation, donc on a la réaction : Zn (s) = Zn^{2+} (aq) + 2 e^-.

La cathode est le siège d'une réduction, donc on a la réaction : Zn^{2+} (aq) + 2 e^- = Zn (s).

3. On a prélevé l'électrode où le métal se formait, donc c'est la cathode.

› Synthèse

Le document 3 permet de calculer la masse de zinc formé à la cathode au bout d'un mois.

La quantité de matière de zinc formé en un mois est :

$$n(\text{Zn}) = \frac{m(\text{Zn})}{M(\text{Zn})} = \frac{52}{65{,}4} = 0{,}80 \text{ mol.}$$

D'après la demi-équation Zn^{2+} (aq) + 2 e^- = Zn (s), 1 mole de zinc est formée quand 2 moles d'électrons ont été échangées.

La quantité de matière d'électrons échangés est égale au double de la quantité de matière de zinc formé, on a : $n(e^-) = 2 \times n(\text{Zn}) = 2 \times 0{,}8 = 1{,}6$ mol.

On utilise la formule de la quantité de charges électriques échangées : $q = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.

AN : $q = 1{,}6 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19} = 1{,}5 \times 10^5$ C

Cette valeur correspond à 10 % de la consommation totale d'électricité, donc la quantité de charges électriques consommées par l'abonné correspond aux 90 % restants, soit :

$$q = \frac{90 \times 1{,}5 \times 10^5}{10} = 1{,}35 \times 10^6 \text{ C.}$$

33 **1**. On a les demi-équations suivantes :

2 Cl^- (aq) = Cl_2 (g) + 2 e^-

2 H_2O (ℓ) + 2 e^- = H_2 (g) + 2 HO^- (aq)

2. L'équation de la transformation est :

2 H_2O (ℓ) + 2 Cl^-(aq) ⇄ H_2 (g) + Cl_2 (g) + 2 HO^- (aq).

3. On utilise les formules de la quantité de charges électriques échangées :

$q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.

On peut isoler la quantité de matière d'électrons échangés :

$$n(e^-) = \frac{I \cdot \Delta t}{N_A \cdot e}.$$

D'après la demi-équation, la quantité de matière de dichlore formée au bout d'une heure est **:**

$$n(Cl_2) = \frac{n(e^-)}{2} = \frac{I \cdot \Delta t}{2 N_A \cdot e}$$

$$= \frac{15 \times 3\,600}{2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$$

$$= 0{,}28 \text{ mol}$$

4. D'après l'équation, la quantité de matière d'ions hypochlorite formée au bout d'une heure est :

$n(ClO^-) = n(Cl_2) = 0{,}28$ mol

POUR PRÉPARER L'ECE

▮ *p. 206*

1. Proposition de protocole expérimental

On réalise le montage de l'électrolyse de l'eau selon le protocole suivant.

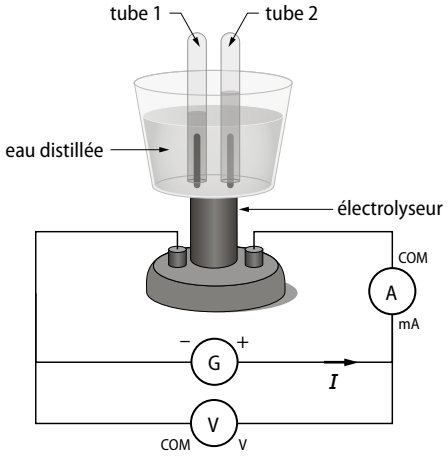
• Remplir l'électrolyseur aux deux tiers d'eau distillée.

• Remplir d'eau deux tubes gradués et les retourner, sans bulles d'air, sur les électrodes.

• Fixer les tubes en les relevant légèrement au-dessus des électrodes.

• Réaliser le montage suivant en prenant soin de brancher l'ampèremètre en série sur le calibre 20 A en position DC et le voltmètre en dérivation sur le calibre 20 V en position DC.

• Allumer le générateur et déclencher le chronomètre en même temps.



2. Mise en œuvre du protocole expérimental

Volume de gaz recueilli à la cathode : 20 mL de dihydrogène

Intensité $I = 300$ mA.

Tension : $U = 6{,}0$ V.

$\Delta t = 5$ min 44 s = 344 s.

Schéma : voir ci-dessus.

3. Exploitation des résultats obtenus

1. Énergie électrique consommée pour produire 20 mL de dihydrogène :

$E = U \cdot I \cdot \Delta t = 6 \times 0{,}300 \times 344 = 619$ J

$= \dfrac{619}{3{,}6 \times 10^6} = 1{,}7 \times 10^{-4}$ kWh.

Cela correspond à l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques qui aurait pu être vendue au fournisseur d'électricité. Le gain de cette vente serait de : $1{,}7 \times 10^{-4} \times 0{,}10 = 1{,}7 \times 10^{-5}$ €.

2. Quantité de matière de dihydrogène formé :

$n(H_2) = \dfrac{V}{V_m} = \dfrac{0{,}020}{24} = 8{,}3 \times 10^{-4}$ mol

Masse de dihydrogène formé :

$m(H_2) = n(H_2) \cdot M(H_2)$

$= 8{,}3 \times 10^{-4} \times 2{,}0$

$= 1{,}7 \times 10^{-3}$ g

Prix de la vente du dihydrogène :

$\dfrac{1{,}7 \times 10^{-3} \times 12}{1\,000} = 2{,}0 \times 10^{-5}$ €

3. Le procédé le plus rentable économiquement semble être la revente du dihydrogène produit par l'électrolyseur.

CHAPITRE 9

Manuel p. 208

Stratégies en chimie organique

LE PROGRAMME

4. Élaborer des stratégies en synthèse organique

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Structure et propriétés Formule topologique. Familles fonctionnelles : esters, amines, amides et halogénoalcanes. Squelettes carbonés insaturés, cycliques. Isomérie de constitution.	Exploiter des règles de nomenclature fournies pour nommer une espèce chimique ou représenter l'entité associée. Représenter des formules topologiques d'isomères de constitution, à partir d'une formule brute ou semi-développée.
Polymères.	Identifier le motif d'un polymère à partir de sa formule. Citer des polymères naturels et synthétiques et des utilisations courantes des polymères.
Optimisation d'une étape de synthèse Optimisation de la vitesse de formation d'un produit et du rendement d'une synthèse.	Identifier, dans un protocole, les opérations réalisées pour optimiser la vitesse de formation d'un produit. Justifier l'augmentation du rendement d'une synthèse par introduction d'un excès d'un réactif ou par élimination d'un produit du milieu réactionnel. *Mettre en œuvre un protocole de synthèse pour étudier l'influence de la modification des conditions expérimentales sur le rendement ou la vitesse.*
Stratégie de synthèse multi-étapes Modification de groupe caractéristique, modification de chaîne carbonée, polymérisation. Protection/déprotection.	Élaborer une séquence réactionnelle de synthèse d'une espèce à partir d'une banque de réactions. Identifier des réactions d'oxydo-réduction, acide-base, de substitution, d'addition, d'élimination. Identifier des étapes de protection/déprotection et justifier leur intérêt, à partir d'une banque de réactions. *Mettre en œuvre un protocole de synthèse conduisant à la modification d'un groupe caractéristique ou d'une chaîne carbonée.*
Synthèses écoresponsables.	Discuter l'impact environnemental d'une synthèse et proposer des améliorations à l'aide de données fournies, par exemple en termes d'énergie, de formation et valorisation de sous-produits et de choix des réactifs et solvants.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 208

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis le fait « qu'équilibrer l'équation associée à la réaction modélisant une transformation » permet également d'apprécier les proportions relatives dans lesquelles réagissent et disparaissent les réactifs et se forment les produits.

› Exemple de réponse attendue

Dans l'hypothèse d'une réaction totale, et relativement à la stœchiométrie de la réaction, un mélange équimolaire de réactifs tel qu'indiqué dans l'énoncé forme 0,10 mol d'éthanoate d'éthyle.

m(éthanoate d'éthyle attendue) = n(éthanoate d'éthyle attendue) · M(éthanoate d'éthyle)

m(éthanoate d'éthyle attendue) = 0,10 × 88 = 8,8 g

Le rendement de la synthèse est :

$$R = \frac{m(\text{éthanoate d'éthyle obtenue})}{m(\text{éthanoate d'éthyle attendue})} \times 100$$

$$= \frac{5,5}{8,8} \times 100$$

soit R = 63 %.

› En classe de Terminale

La notion de stœchiométrie d'une réaction, et celle de rendement qui lui est corrélée, seront réinvesties au cours des **activités 1 et 2** et, de façon générale, dès lors que le rendement d'une synthèse chimique sera un questionnement proposé.

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis l'intérêt que présente le chauffage d'un milieu réactionnel et retenu le montage permettant de le conduire sans perte de matière.

› Exemple de réponse attendue

Seul le montage **B** est un montage à reflux. En effet, le condenseur à eau vertical permet aux vapeurs formées lors du chauffage du milieu réactionnel de retomber dans ce dernier… d'où le qualificatif de « reflux ».

Les deux autres montages permettent d'isoler du milieu réactionnel l'espèce chimique dont la température d'ébullition est la plus basse.

› En classe de Terminale

La technique du chauffage à reflux sera réinvestie dans les **activités 1 et 2** et dans nombre d'exercices où la nécessité d'augmenter la vitesse volumique d'apparition d'un produit sera questionnée. Les deux autres montages seront proposés lorsqu'il s'agira de déplacer un équilibre chimique afin d'améliorer le rendement d'une synthèse.

ACTIVITÉS

p. 210

ACTIVITÉ 1

Synthèse de l'acide hippurique

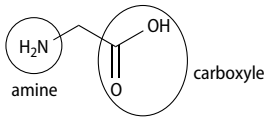
Commentaires pédagogiques

Cette activité expérimentale permet aux élèves de réaliser une synthèse chimique dans toutes ses étapes et de réinvestir leurs connaissances en matière de réaction acide-base.

Partie 1

› Exploitation et analyse

1.

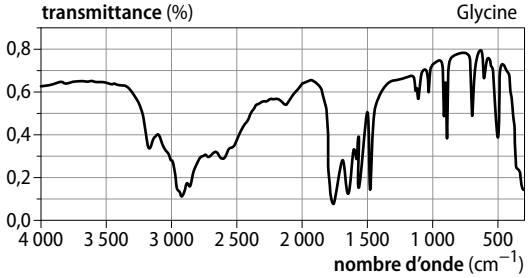


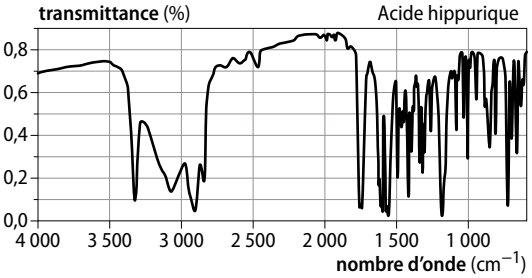
2. a. La molécule A a été formée par réaction de la fonction carboxyle de la glycine sur le chlorure de benzoyle. La fonction amine de la glycine est demeurée inchangée.

La molécule B a été formée par réaction de la fonction amine de la glycine sur le chlorure de benzoyle. La fonction carboxyle de la glycine est demeurée inchangée.

b. La fonction chimique qui s'est formée lors de la synthèse de la molécule B est la fonction amide.

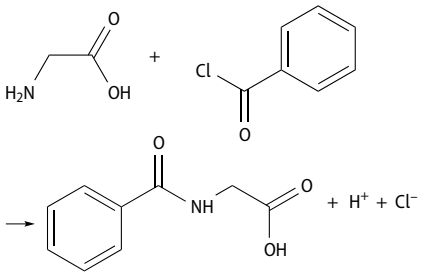
3.





Tout comme la glycine, la molécule B contient la fonction carboxyle. On retrouve bien, sur les deux spectres IR, les bandes caractéristiques des acides carboxyliques (O–H à 2 500 – 3 200 cm^{-1} et C=O à 1 740 – 1 800 cm^{-1}). L'acide hippurique est donc la molécule B.

4. a.



b. Le sous-produit formé lors de la synthèse de l'acide hippurique est l'acide chlorhydrique.

5. Le chlorure de benzoyle ne réagit que sur l'une des fonctions organiques de la glycine : on peut donc le qualifier de « chimiosélectif ».

Partie 2

› Expérience et exploitation

2. $n(\text{glycine}) = \dfrac{m(\text{glycine})}{M(\text{glycine})} = \dfrac{2,5}{75,1} = 3,3 \times 10^{-2}$ mol

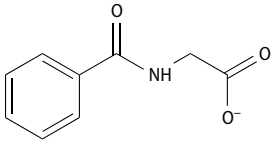
$$n(\text{chlorure de benzoyle}) = \frac{m(\text{chlorure de benzoyle})}{M(\text{chlorure de benzoyle})}$$

$$= \frac{\rho(\text{chlorure de benzoyle}) \cdot V(\text{chlorure de benzoyle})}{M(\text{chlorure de benzoyle})}$$

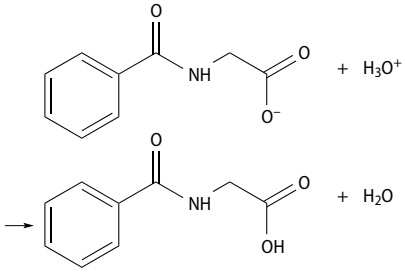
$$= \frac{1,21 \times 4,5}{141} = 3,9 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

3. Relativement à la stœchiométrie de la réaction, en supposant la réaction totale, la glycine étant le réactif limitant, on va donc former $3,3 \times 10^{-2}$ mol d'acide hippurique à l'issue de la synthèse.
Soit m(acide hippurique)
$= n(\text{acide hippurique}) \cdot M(\text{acide hippurique})$
$= 3,3 \times 10^{-2} \times 179 = 5,9$ g

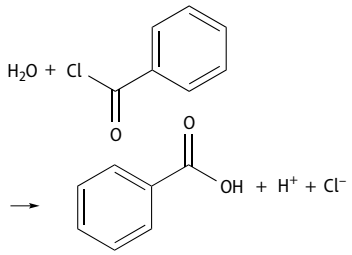
4. Comme l'indique clairement son nom, l'ion hippurate est la base conjuguée de l'acide hippurique. Sa formule chimique est :



L'acide hippurique précipite lors de l'ajout d'acide chlorhydrique selon la réaction acide-base suivante :



5.



6. Le solide obtenu est constitué d'acide benzoïque et d'acide hippurique ; il convient donc de le purifier pour ne conserver que l'acide hippurique. Dans le doc. 3, on peut lire que l'acide benzoïque est soluble à froid dans l'éthoxyéthane, alors que l'acide hippurique y est très peu soluble. Lorsqu'on lave les cristaux, l'acide benzoïque se dissout dans l'éthoxyéthane, contrairement à l'acide hippurique. Ainsi, un lavage à froid avec de l'éthoxyéthane permet la solubilisation de l'acide benzoïque, éliminé avec le liquide ; l'acide hippurique restant dans le Büchner.

› Conclusion

7. $R = \dfrac{m(\text{acide hippurique})_{\text{obtenue}}}{m(\text{acide hippurique})_{\text{attendue}}} \times 100$

$$= \frac{m(\text{acide hippurique})_{\text{obtenue}}}{5,9} \times 100$$

p. 212 ACTIVITÉ 2

Synthèses comparées d'une espèce odorante

Commentaires pédagogiques

Cette activité expérimentale permet à l'élève d'apprécier en quoi l'état initial d'un système chimique est susceptible d'influencer l'état final de celui-ci et donc le rendement d'une synthèse.

› Expérience et exploitation

2. • *Expérience A* :
Acide benzoïque :

$$n(\text{acide}) = \frac{m(\text{acide})}{M(\text{acide})} = \frac{12,2}{122} = 0,100 \text{ mol}$$

Méthanol :

$$n(\text{alcool}) = \frac{\rho(\text{alcool}) \cdot V(\text{alcool})}{M(\text{alcool})} = \frac{0,80 \times 4,00}{32}$$

$$= 0,10 \text{ mol}$$

• *Expérience B* :
Acide benzoïque :

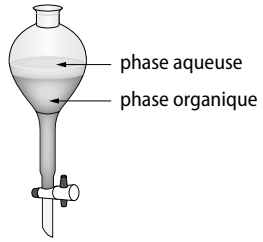
$$n(\text{acide}) = \frac{m(\text{acide})}{M(\text{acide})} = \frac{12,2}{122} = 0,100 \text{ mol}$$

Méthanol :

$$n(\text{alcool}) = \frac{\rho(\text{alcool}) \cdot V(\text{alcool})}{M(\text{alcool})} = \frac{0,80 \times 40,0}{32}$$

$$= 1,0 \text{ mol}$$

3. a.



La masse volumique du benzoate de méthyle est plus importante que celle de l'eau. La phase organique, dont le constituant majoritaire est le benzoate de méthyle formé, est donc la phase inférieure dans l'ampoule à décanter.

b. Ajouter de l'eau salée au milieu réactionnel permet de séparer le méthanol éventuellement en excès, qui y est soluble, du benzoate de méthyle, qui y est insoluble.

c. La solution d'hydrogénocarbonate de sodium introduite dans la phase organique permet d'éliminer de celle-ci toute trace d'acide benzoïque. En effet, ce dernier réagit avec l'ion hydrogénocarbonate selon la réaction acido-basique d'équation :

$$HCO_3^- (aq) + C_6H_5CO_2H (aq) \rightarrow C_6H_5CO_2^- (aq) + CO_2 (aq), H_2O (\ell)$$

4. Le milieu réactionnel correspondant à l'expérience A est stœchiométrique. Les réactifs sont simultanément limitants et, relativement à la stœchiométrie de la réaction, la quantité de matière de benzoate de méthyle formée est égale à 0,100 mol, soit une masse de 13,6 g.

Le méthanol est présent en large excès dans le milieu réactionnel correspondant à l'expérience B : le réactif limitant est l'acide benzoïque et la masse de benzoate de méthyle attendue est donc égale à 13,6 g.

$$R = \frac{m(\text{benzoate de méthyle})_{\text{obtenue}}}{m(\text{benzoate de mathyle})_{\text{attendue}}} \times 100$$

$$= \frac{m(\text{benzoate de méthyle})_{\text{obtenue}}}{13{,}6} \times 100$$

On trouve un rendement supérieur dans l'expérience B.

› Conclusion

5. Le calcul du rendement associé à chacune de ces synthèses laisse apparaître le fait qu'introduire un réactif en large excès favorise la formation des produits, donc permet l'augmentation du rendement.

p. 213 **ACTIVITÉ 3**

Stratégie de synthèse organique

Commentaires pédagogiques

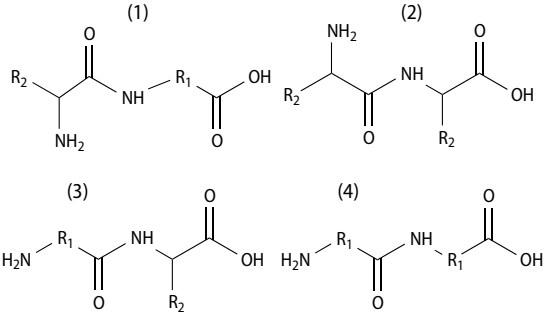
Cette activité d'investigation permet aux élèves de saisir la nécessité de la protection de fonction dans le cas de synthèse organique où sont engagés des réactifs polyfonctionnels et non chimiosélectifs.

› Pistes de résolution

1. Les acides alpha-aminés portent le groupe amine —NH_2 et le groupe carboxyle —COOH.

2. La liaison peptidique qui se forme entre deux acides aminés est en fait une fonction amide.

3. a.



b. La Met-enképhaline est le composé (1) ci-dessus.

› Conclusion

4. 1re étape : protection de la fonction amine du réactif A en utilisant la réaction ❷ proposée par le doc. 3.

2e étape (ou 1re étape bis) : protection de la fonction carboxyle du réactif B en utilisant la réaction ❸ proposée par le doc 3.

3e étape : réaction entre A et B protégés.

4e étape : déprotection simultanée de A et B par du dihydrogène H_2, tel que décrit par les réactions ❺ et ❻ proposées par le doc. 3.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel *p. 218*

1 La proposition A est une bonne réponse.

La proposition B n'est pas une bonne réponse car, dans la représentation topologique d'une molécule, les atomes d'hydrogène liés à un atome de carbone n'apparaissent pas.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car, dans la représentation topologique d'une molécule, les atomes d'hydrogène liés à un atome de carbone n'apparaissent pas.

2 La proposition A est une bonne réponse.

La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car des molécules isomères comptent le même nombre d'atomes de chaque élément chimique : le nombre d'atomes d'hydrogène de ce « diol » est de 10 alors que l'éthanoate d'éthyle initial n'en compte que 8.

3 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la formule d'un polymère fait apparaître « *n* fois » celle du monomère correspondant, or il n'y a pas ici d'atome d'hydrogène dans le monomère proposé.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la formule d'un polymère fait apparaître « *n* fois » celle du monomère correspondant, or il n'y a pas ici d'atome d'hydrogène dans le monomère proposé.

4 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, pour augmenter la vitesse d'une réaction, il convient d'agir sur les facteurs cinétiques et la distillation n'en est pas un !
La proposition C est une bonne réponse.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le fait de chauffer influence la cinétique de la réaction et en aucun cas l'état final du système chimique considéré et donc le rendement de la transformation.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

6 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car une élimination conduit à l'obtention de deux molécules à partir d'une seule.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car une substitution consiste à remplacer une partie de la molécule d'intérêt par une autre sans modification complète de la chaîne carbonée.

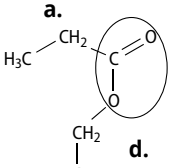
7 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

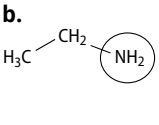
8 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car si le réactif est chimiosélectif, il ne réagit qu'avec l'une des fonctions organiques de la molécule polyfonctionnelle initiale et laisse l'autre inchangée.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car il n'y a aucun rapport avec la notion de chimiosélectivité.

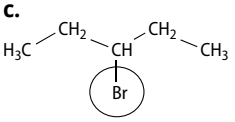
Acquérir les bases *p. 219*

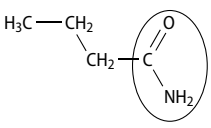
› 1. Structure et propriétés

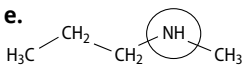
9 **1.**

a. 

b. 

c. 

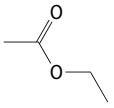
d. 

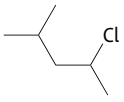
e. 

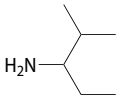
2. a. Esters.
b. Amines.
c. Halogénoalcanes
d. Amines.
e. Amines.

3. a. Propanoate d'éthyle.
b. Éthanamine.
c. 3-bromopentane.
d. Propanamide.
e. N-méthyl-propanamine.

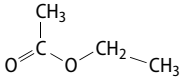
10 **1.** Dans la formule topologique d'une molécule organique n'apparaissent pas les symboles chimiques des atomes de carbone C et d'hydrogène H qui leurs sont liés.
Les liaisons C—C sont représentées par des segments.

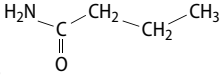
a. 
Éthanoate d'éthyle

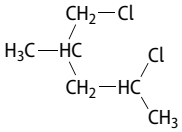
b. 
4-méthyl-2-chloropentane

c. 
2-méthyl-pentan-3-amine

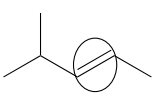
2. Nommer une molécule organique, c'est dans un premier temps, repérer la ou les fonctions chimiques qu'elle porte, puisque déterminante(s) du nom. Dans un second temps, repérer la chaîne carbonée qui la porte afin de préciser ce nom, puis les substituants.

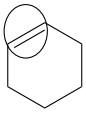
a. 
Éthanoate d'éthyle

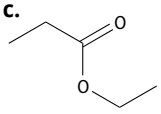
b. 
Butanamide

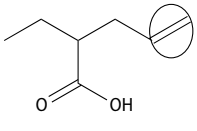
c. 
2-méthyl-1,4-dichloropentane

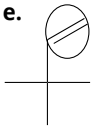
11

a. 

b. 

c. 

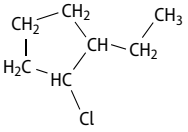
d. 

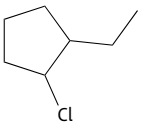
e. 

La double liaison C=O n'est pas une insaturation de la chaîne carbonée : elle correspond à une fonction ester dans la molécule **c.,** carboxyle dans la molécule **d.**

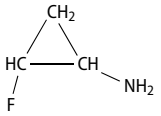
12 **1.**

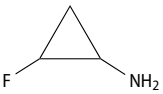
a.





b.

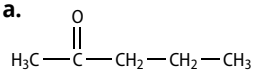




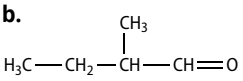
2. Éthanoate de cyclohexyle.

13 On repère les molécules comme ci-dessous :

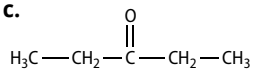
a.



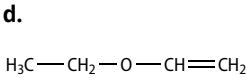
b.



c.



d.

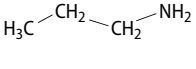


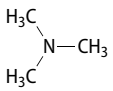
1. Des molécules isomères ont la même formule brute mais se distinguent par leur formule semi-développée ou développée. Les molécules **a.**, **b.** et **c.** sont isomères.

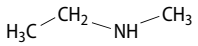
2. Les molécules **a.** et **b.** sont des isomères de chaîne et de fonction ; tout comme les molécules **b.** et **c**. Les molécules **a.** et **c.** sont des isomères de position.

14 Des molécules isomères comptent le même nombre d'atomes de chaque type, leur agencement est différent.

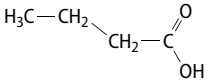
a.

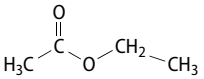


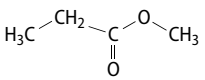




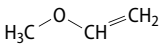
b.

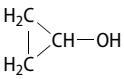


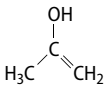




c.

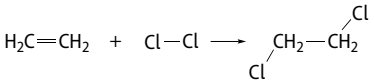






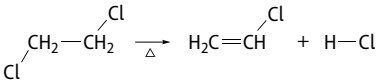
15 **1.** Les formules semi-développées des molécules font apparaître les symboles chimiques de tous les atomes y participant et toutes les liaisons à l'exception de celles qui engagent un atome H.

L'équation de la réaction correspondant à la première étape de synthèse est :

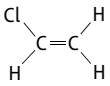


2. Le composé di-halogéné obtenu est le 1,2-dichloroéthane.

3. Le fait de chauffer est figuré par un triangle sous la flèche présente dans l'équation qui formalise l'équation associée à la réaction considérée.
L'équation de la réaction correspondant à la seconde étape de synthèse est :



4. Le motif du polychlorure de vinyle est :



5. On désigne par le terme de « polymère » le polychlorure de vinyle car il est constitué par l'addition de « n » molécules de chlorure de vinyle, le monomère de ce polymère.

› 2. Optimisation d'une synthèse

16 **1.** En comparant les courbes associées aux expériences, on constate que la température du milieu réactionnel et la nature du solvant, c'est-à-dire les proportions relatives d'eau et d'acétone, sont déterminantes de l'évolution temporelle de l'avancement de la réaction et donc de la vitesse volumique d'apparition d'un produit qui y est corrélée.

2. Les quantités de matières de réactifs introduites pour les expériences ❶, ❷ et ❸ étant identiques, l'état final du système chimique sera donc le même.
En comparant les courbes expérimentales associées à chacune de ces expériences, on constate que l'augmentation de la température conduisant à celle de la vitesse volumique d'apparition, l'état final sera plus vite atteint pour l'expérience ❸ que pour l'expérience ❷ ou encore l'expérience ❶.
En comparant les courbes associées aux expériences ❸ et ❹, puisque se déroulant à température identique, on constate que la nature du solvant, c'est-à-dire les proportions relatives d'eau et d'acétone, détermine également la vitesse volumique d'apparition d'un produit et donc la date à laquelle l'état final sera atteint.

17 **1.** Les montages Ⓐ et Ⓒ permettent d'améliorer le rendement de la synthèse chimique en éliminant un des produits de la réaction.

2. Quel que soit le montage utilisé, il convient que la température d'ébullition d'un des produits de la synthèse envisagée soit plus basse que celles des réactifs de celle-ci, on peut dès lors l'éliminer et donc déplacer l'équilibre chimique dans le sens de sa formation, qui correspond à l'épuisement des réactifs.

18 **1.** Le montage de chauffage à reflux permet d'augmenter la vitesse volumique d'apparition d'un produit en évitant toute perte de matière.

2. L'acide sulfurique est un catalyseur de réaction, il permet donc d'augmenter la vitesse volumique d'apparition d'un produit.

3. $n(\text{alcool}) = \dfrac{m(\text{alcool})}{M(\text{alcool})} = \dfrac{18{,}0}{88} = 0{,}20 \text{ mol}$

$$n(\text{acide}) = \frac{\rho(\text{acide}) \cdot V(\text{acide})}{M(\text{acide})} = \frac{1{,}05 \times 58}{60} = 1{,}0 \text{ mol}$$

L'acide est introduit en excès, dans ce cas l'avancement final sera augmenté, donc le rendement sera supérieur à 67 %, rendement obtenu dans le cas d'un mélange équimolaire.

19 **1.** L'acide sulfurique est un catalyseur de réaction et permet d'augmenter la vitesse volumique d'apparition d'un produit.

2. $n(\text{acide}) = 0{,}22$ mol et $n(\text{alcool}) = 0{,}22$ mol.
La quantité de matière de butanoate d'éthyle attendue est donc de 0,22 mol, relativement à la stœchiométrie de la réaction de synthèse.

$m(\text{butanoate d'éthyle})_{\text{attendue}} = n(\text{butanoate d'éthyle})_{\text{attendue}} \cdot M(\text{butanoate d'éthyle})$

$m(\text{butanoate d'éthyle})_{\text{attendue}} = 0{,}22 \times 116 = 26 \text{ g}$

$$R = \frac{m(\text{butanoate d'éthyle})_{\text{obtenue}}}{m(\text{butanoate d'éthyle})_{\text{attendue}}} \times 100 = \frac{17{,}4}{26} \times 100 = 67 \%$$

3. Introduire un réactif en excès tel qu'énoncé par la proposition **a.** conduit à l'augmentation du rendement. De la même façon, distiller l'eau formée au cours de la synthèse, comme proposé en **c**., déplace l'équilibre dans le sens de la formation des produits et conduit donc à l'augmentation du rendement.

› 3. Stratégies pour une synthèse multi-étapes

20 **1.** Les réactions des étapes ❶ et ❷ sont des réactions d'addition : à partir de deux molécules, une unique molécule est formée. De plus, considérant l'étape ❶, une liaison multiple est transformée en liaisons simples.
La réaction de l'étape ❸ est une réaction d'élimination : à partir d'une unique molécule de départ sont formées plusieurs molécules.

2. Une synthèse écoresponsable souscrit « aux principes de la chimie verte » : l'économie d'atome, c'est-à-dire leur valorisation dans le produit formé, est l'un de ces principes.
Dans une réaction d'addition, tous les atomes engagés dans les réactifs se retrouvent dans le produit recherché, contrairement à une réaction d'élimination ! De plus, dans ce type de réaction, il conviendra d'isoler le produit d'intérêt en utilisant un solvant extracteur, ce qui va à l'encontre de cette chimie responsable.

3. Au départ de ce mode de synthèse, un unique réactif est utilisé. Les deux étapes de cette synthèse sont catalysées par le dioxygène, puis par des ions métalliques en phase liquide ou des métaux lors d'une synthèse en phase vapeur. Le recours à cette synthèse en phase vapeur rend possible une régénération en continu du catalyseur solide et améliore la sélectivité de la synthèse. Le dioxyde de carbone, coproduit de la réaction, doit toutefois être séquestré ou valorisé.

4. Si cette voie de synthèse est peu utilisée relativement au procédé HOCK, c'est certainement du fait de son coût énergétique. De plus, le coproduit formé lors du procédé HOCK est l'acétone, qui une fois séparée peut être valorisée : c'est un excellent solvant et un intermédiaire de synthèse très utilisé notamment pour la synthèse des plastiques ou des médicaments.

21 **1.** Les réactions des étapes ❶, ❷ et ❸ sont des réactions de substitution : un atome ou un groupe d'atomes est remplacé par un autre dans la molécule d'intérêt.

2. a. L'action de l'acide nitrique sur l'aniline conduirait à la substitution de l'un des atomes d'hydrogène du cycle par le groupe « nitro », et à la nitration du groupe amine.

b. L'étape ❶ de cette synthèse consiste en la protection du groupe amine par une fonction amide.

c. L'acide nitrique ne réagissant pas avec la fonction amide, l'étape ❷ est chimiosélective.

d. L'étape ❸ consiste en la déprotection de la fonction amine, c'est-à-dire la transformation sélective du groupe amide protecteur en le groupe amine souhaité.

Faire le point avant d'aller plus loin *p. 221*

◗ ***Expliquer comment calculer le rendement d'une synthèse organique.***

Le rendement R d'une synthèse organique est donné par l'expression suivante :

$$R = \frac{\text{masse de produit d'intérêt obtenue}}{\text{masse de produit d'intérêt attendue}} \times 100$$

$$= \frac{\text{quantité de matière de produit d'intérêt obtenue}}{\text{quantité de matière de produit d'intérêt attendue}} \times 100$$

◗ ***Expliquer comment écrire la formule topologique d'une molécule.***

La formule topologique est un mode de représentation simplifié des molécules organiques : on ne représente pas les atomes de carbone et d'hydrogène à l'exception de ceux liés à un hétéroatome (O, N, ...).

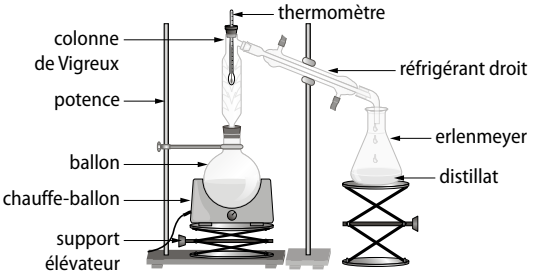
Les liaisons covalentes sont représentées par des traits.

◗ ***Expliquer la nécessité ponctuelle de protéger une fonction organique.***

Lorsqu'une molécule possède plusieurs groupes fonctionnels et en l'absence de réactif chimiosélectif, c'est-à-dire n'agissant que sur une unique fonction organique, il est nécessaire, au cours d'une synthèse, de protéger les fonctions que l'on ne souhaite pas modifier.

◗ ***Schématiser un dispositif expérimental permettant l'augmentation du rendement d'une synthèse.***

Un montage de distillation permet d'augmenter le rendement d'une synthèse si et seulement si le produit d'intérêt ou un de ses coproduits peut être isolé au cours de sa formation : sa température d'ébullition doit donc être la plus basse.



◗ ***Définir ce que sont des molécules isomères.***

Des isomères de constitution sont des molécules de même formule brute, mais avec un enchaînement d'atomes différent : leurs formules développées ou semi-développées sont différentes.

◗ ***Savoir ce qu'est un polymère et expliquer le principe de sa formation.***

Les polymères sont des macromolécules, répétition d'un motif élémentaire : le monomère. Ils sont obtenus par addition de ce monomère sur lui-même.

◗ ***Citer les grandes catégories de réactions.***

Les grandes catégories de réactions sont : addition, élimination et substitution.

◗ ***Identifier dans un protocole de synthèse les étapes permettant d'accélérer la réaction.***

Pour augmenter la vitesse volumique d'apparition d'un produit, il convient alors d'agir sur les facteurs cinétiques :

− la température (que l'on augmentera) et la concentration des réactifs (que l'on augmentera) ;

− l'état de division des réactifs (à maximiser), la nature du solvant ;

− l'usage d'un catalyseur conduisant à la formation d'intermédiaires réactionnels plus réactifs.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 222 et 223

23 **1.** L'emploi d'un excès de réactif, tel l'acide propanoïque, permet d'améliorer le rendement de la réaction.

2. Substituer l'acide éthanoïque par de l'anhydride éthanoïque permet à cette réaction de devenir totale.

3. La courbe B indique la valeur de x_m, l'avancement maximal de la réaction, soit la quantité de matière d'arôme d'abricot obtenu en considérant sa réaction de synthèse comme totale. Cette valeur est conditionnée par celle de l'alcool initialement introduit en défaut.

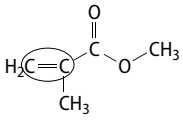
On lit $x_m = 0{,}19$ mmol.

La courbe A permet de lire $x_f = 0{,}17$ mmol dont la valeur est également conditionnée par la quantité d'alcool introduite puisqu'en défaut.

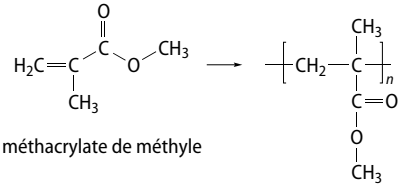
La quantité d'alcool introduite dans ces expériences étant identique, on peut donc utiliser la valeur de x_m (déterminé depuis la voie de synthèse n° **2**) pour calculer le rendement R de la synthèse n° **1**.

$$R = \frac{x_f}{x_m} \times 100 = \frac{0{,}17}{0{,}19} \times 100 = 89\ \%.$$

25 **1.** Une insaturation est une double ou triple liaison C—C.



2. L'équation de la réaction de polymérisation est :



méthacrylate de méthyle

polyméthacrylate de méthyle

3. Ce polymère est un polyester. En effet, son monomère porte la fonction « ester ».

4. Le PMMA est parfaitement recyclable, ce qui en fait un polymère précieux du point de vue de la chimie durable. Il reste toutefois produit à partir de composés issus de la pétrochimie.

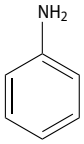
S'entraîner pour maîtriser p. 224

26 **1.** L'estérification est une substitution car de l'eau est formée en plus de l'ester.

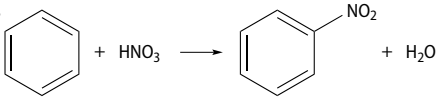
2. La vitesse volumique d'apparition d'un produit est augmentée en chauffant le milieu réactionnel et en ajoutant dans ce milieu de l'acide sulfurique, un catalyseur.

3. L'ester formé l'est plus rapidement, mais pas en plus grande quantité. Le rendement demeure inchangé.

27 **1.** L'aniline porte la fonction amine $-NH_2$.

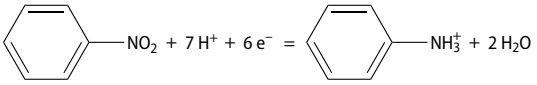


2. a.

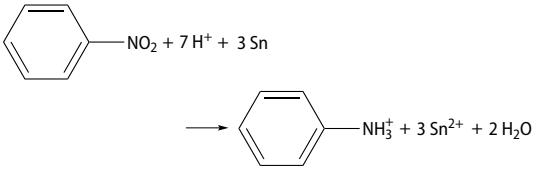


b. Cette réaction est une réaction de substitution.

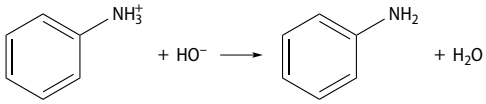
3. a. et **b.**



(x 3) $Sn = Sn^{2+} + 2\,e^-$



4.



C'est une réaction acide-base.

5. $n(\text{nitrobenzène}) = \dfrac{m(\text{nitrobenzène})}{M(\text{nitrobenzène})}$

$= \dfrac{10,0}{123} = 8,13 \times 10^{-2}$ mol

$n(\text{Sn}) = \dfrac{m(\text{Sn})}{M_{\text{Sn}}}$

$= \dfrac{22,0}{118,7} = 18,5 \times 10^{-2}$ mol

On suppose l'acide chlorhydrique introduit en large excès.

Relativement à la stœchiométrie de la réaction de synthèse, l'étain Sn est le réactif limitant et l'avancement maximal est égal à $\dfrac{18,5 \times 10^{-2}}{3} = 6,18 \times 10^{-2}$ mol.

La quantité de matière d'ions anilinium attendue est donc égale à $6,18 \times 10^{-2}$ mol, relativement à la stœchiométrie de la réaction de synthèse. Comme l'indique la stœchiométrie de la réaction écrite à la question **4**, la quantité de matière d'aniline obtenue sera de $6,18 \times 10^{-2}$ mol soit une masse de $6,18 \times 10^{-2} \times 93,1 = 5,75$ g.

$R = \dfrac{m(\text{aniline})_{\text{obtenue}}}{m(\text{aniline})_{\text{attendue}}} \times 100$

$= \dfrac{4,50}{5,75} \times 100 = 78,3$ %

28 ***Récupération d'un gaz à effet de serre***

Les polyuréthanes sont des polymères extrêmement répandus. Les uréthanes sont les monomères correspondants. Historiquement, ils étaient préparés à part d'isocyanates, traditionnellement synthétisés par phosgénation d'une amine. Plus tard, un nouveau procédé de synthèse a été développé où le phosgène a été remplacé par du dioxyde de carbone.

1. *Quels sont réactifs de la synthèse historique des polyuréthanes ?*

2. *Quel est l'inconvénient majeur de l'un de ces réactifs ?*

3. *Par quel autre réactif a-t-il été remplacé ensuite ?*

4. *Quel est l'intérêt du second procédé de synthèse du point de vue de la chimie verte, aussi appelée « chimie durable », dont les principes consistent à réduire et éliminer l'emploi ou la production de substances dangereuses pour l'environnement* ?

1. Les réactifs historiques de la synthèse des polyuréthanes sont une amine et le phosgène (ou dichlorure de méthanoyle).

2. Le phosgène est, à température ambiante, un gaz des plus toxiques, qui fait partie des armes chimiques et gaz de combat de la classe des agents suffocants. C'est un groupe de chimistes français mené par Victor Grignard qui l'a mis au point. Son premier usage comme gaz de combat date de 1915.

3. Le phosgène est remplacé par du dioxyde de carbone.

4. Du point de vue de la chimie verte, la synthèse des polyuréthanes, en utilisant du dioxyde de carbone (un gaz à effet de serre), permet sa valorisation et réduit donc d'autant son rejet dans l'atmosphère.

29 › Partie 1

1. Cette réaction consiste en une modification de chaîne, puisque la double-liaison carbone/carbone n'est pas un groupe caractéristique.

2. Cette réaction est une élimination.

3. L'oxyde de zinc et l'oxyde de magnésium sont solides. L'éthylbenzène est liquide à température ambiante. Il s'agit donc d'une catalyse hétérogène.

› Partie 2

Démarche experte

On calcule le pourcentage massique de styrène (voir *Démarche avancée*). Le résultat montre que le styrène s'est bien conservé.

Démarche avancée

1. Le coefficient directeur de la droite est :

$$k = \frac{0,72 - 0,18}{0,4 - 0,1} = 1,8 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$$

2. $c_m(\text{styrène}) = \frac{A}{k} = \frac{0,15}{1,8} = 8,3 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

3. On a donc :

$$m(\text{styrène}) = c_m(\text{styrène}) \cdot V$$
$$= 8,3 \times 10^{-2} \times 50,0 \times 10^{-3}$$
$$= 4,15 \times 10^{-3} \text{ g} = 4,2 \text{ mg}$$

4. Le pourcentage massique est :

$$\%_{\text{massique}}(\text{styrène}) = \frac{m(\text{styrène})}{m(\text{totale})}$$
$$= \frac{4,2}{10} = 0,42 = 42 \text{ \%}.$$

Le pourcentage de styrène dans l'échantillon est donc bien conforme aux indications portées sur le flacon.

30 1. Le montage **B** est le montage décrit par le protocole de synthèse.

2. Le choix du chauffage et l'introduction d'un catalyseur ont pour objet d'augmenter la vitesse volumique d'apparition d'un produit. Le choix du montage à reflux est justifié par le souci d'éviter toute perte de matière.

3. $n(\text{alcool}) = \frac{\rho(\text{alcool}) \cdot V(\text{alcool})}{M(\text{alcool})} = \frac{1,04 \times 20,8}{108}$

$$= 0,200 \text{ mol}$$

$$n(\text{acide}) = \frac{\rho(\text{acide}) \cdot V(\text{acide})}{M(\text{acide})} = \frac{1,05 \times 11,4}{60,0}$$

$$= 0,200 \text{ mol}$$

Relativement à la stœchiométrie de la réaction, l'acide éthanoïque est le réactif limitant et :
$n(\text{éthanoate de benzyle}) = 0,200$ mol.

$$V(\text{éthanoate de benzyle}) = \frac{n(\text{éthanoate de benzyle}) \cdot M(\text{éthanoate de benzyle})}{\rho(\text{éthanoate de benzyle})}$$

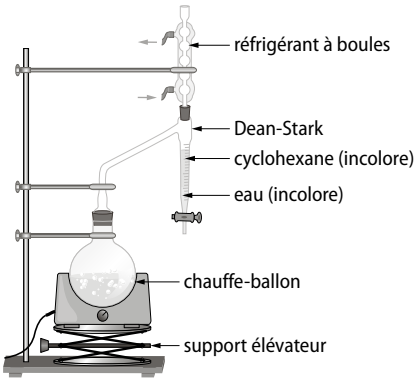
$$= \frac{0,200 \times 150}{1,06} = 28,3 \text{ mL}$$

$$R = \frac{\text{volume d'éthanoate de benzyle obtenu}}{\text{volume d'éthanoate de benzyle attendu}} \times 100$$

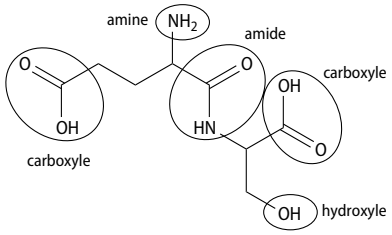
$$= \frac{18,9}{28,3} \times 100 \text{ soit } R = 67 \text{ \%}.$$

4. Pour augmenter le rendement de cette synthèse, il convient d'éliminer l'un des produits de la réaction, en l'occurrence l'eau, en la distillant simultanément à sa formation : on utilise donc le montage **A**.

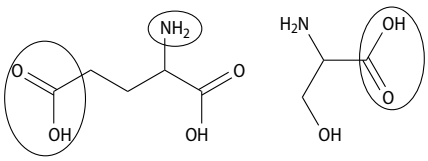
On pourrait également utiliser le montage **C** qui est un Dean-Stark : l'eau évaporée lors du chauffage est « piégée » par le cyclohexane, moins dense que celle-ci, et qui ne lui est pas miscible. L'eau est également ici éliminée au cours de sa formation.



31 1.



2. a. Une des fonctions carboxyle et la fonction amine de l'acide glutamique nécessitent une protection, tout comme la fonction carboxyle de la sérine.



b. L'étape ❶ correspond à la protection de la fonction amine de l'acide glutamique ; les étapes ❷ et ❸ correspondant à la protection sélective de l'une des deux fonctions carboxyle de cette même molécule. L'étape ❶ bis correspond à la protection de la fonction carboxyle de la sérine.

c. L'étape ❺ correspond à la déprotection simultanée des trois fonctions protégées. L'étape ❸ correspond à la déprotection sélective de l'une des deux fonctions carboxyles de l'acide glutamique.

e. Avec deux acides α-aminés tels que l'acide glutamique et la sérine, on est susceptible de former 4 dipeptides différents : Glu-Glu (voire deux molécules différentes selon la fonction carboxyle qui réagira avec la fonction amine de l'acide glutamique), Ser-Ser, Glu-Ser (et une autre molécule si c'est l'autre fonction carboxyle de l'acide glutamique qui réagit avec la fonction amine de la sérine) et Ser-Glu.

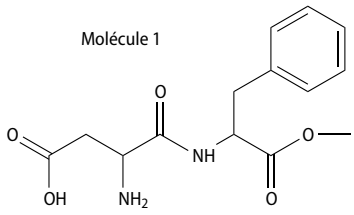
32 Exemple d'exposé oral

L'acide aspartique et l'ester méthylique de la phénylalanine comptent respectivement deux fonctions carboxyles et une fonction amine et, pour l'autre, une fonction amine (ainsi qu'une une fonction ester qui ici ne réagira pas).

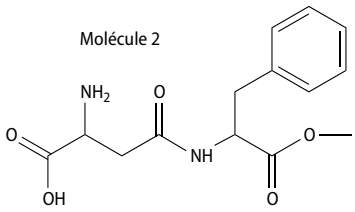
Les fonctions carboxyle et amine sont susceptibles de réagir ensemble pour former une liaison peptidique, une fonction amide.

En mettant en présence l'acide aspartique et l'ester méthylique de la phénylalanine vont donc se former 4 **dipeptides** différents :

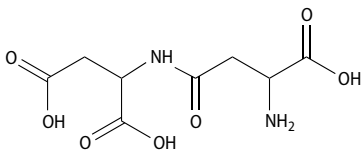
Molécule 1



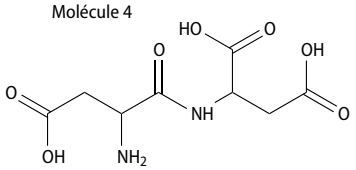
Molécule 2



Molécule 3



Molécule 4



Seule la molécule 1 est l'aspartame ici souhaité.

Pour synthétiser le seul aspartame, il convient donc de **protéger la fonction** amine de l'acide aspartique ainsi que l'une de ses fonctions carboxyles, en l'occurrence celle en α de la fonction amine. La réaction entre cette molécule « protégée » et l'ester méthylique de la phénylalanine conduira à l'obtention d'un unique produit. La **déprotection** des deux fonctions précédemment protégées conduira alors, en une ultime étape, à la synthèse de l'aspartame.

33 Exemple d'exposé oral

Lors d'une synthèse chimique, on peut tout d'abord augmenter la vitesse volumique d'apparition d'un produit en agissant sur les facteurs cinétiques que sont :

– la température et la concentration des réactifs ;

– l'état de division des réactifs, la nature des solvants ;

– l'usage d'un catalyseur.

Pour optimiser une synthèse, on peut également améliorer le rendement en :

– jouant sur la nature des réactifs ;

– introduisant un réactif en excès ;

– éliminant un des produits grâce à un montage expérimental (distillation, Dean Stark...).

Développer ses compétences *p. 227*

34 › Analyse

1. On sait que $E = \dfrac{1 - E_A}{E_A}$.

Pour le procédé MGC : $E = \dfrac{1 - 0{,}69}{0{,}69} = 0{,}45$.

Pour le procédé ACH : $E = \dfrac{1 - 0{,}465}{0{,}465} = 1{,}15$.

Pour le procédé isobutène : $E = \dfrac{1 - 0{,}735}{0{,}735} = 0{,}36$.

Ainsi, indépendamment de toute autre considération, on montre que le procédé ACH est celui qui génère le plus de déchets : pour chaque kg de MAM produit est produit 1,15 kg de déchets ! Ce sont des déchets qu'il faudra séparer puis traiter pour les recycler, les valoriser ou les détruire, avec un impact environnemental et énergétique important.

2. A est une réaction d'addition, **C** est une réaction de substitution et **D** une réaction d'élimination.

3. La catégorie de réaction permettant la plus grande économie d'atomes est la réaction d'addition car tous les atomes engagés dans les réactifs figurent dans le produit attendu.

› Synthèse

Relativement aux principes de la chimie verte, le procédé isobutène semble devoir être à privilégier ; comme semblent l'indiquer les valeurs de son E_A et de son facteur *E*.

On peut toutefois préciser que le procédé MGC produit du méthanamide qui est valorisé en HCN, un des réactifs initiaux de la synthèse, tandis que le procédé ACH produit du NH_4HSO_4, qui est un fertilisant.

Concernant la nocivité des espèces chimiques utilisées :

– les procédés ACH et MGC utilisent du cyanure d'hydrogène, extrêmement toxique ;

– le procédé ACH utilise de l'acide sulfurique H_2SO_4, qui est corrosif ;

– les procédés isobutène et ACH nécessitent du méthanol. Le méthanol est synthétisé à 98 % à partir du gaz de synthèse, mélange de dihydrogène et de monoxyde de carbone, lui-même obtenu par vaporeformage du gaz naturel ou par gazéification du charbon. Il existe toutefois des méthodes alternatives de production de cet alcool à partir de la biomasse.

Au regard de ces informations, le procédé ACH semble le plus polluant, tandis que le procédé isobutène semble le moins polluant.

Concernant les dépenses énergétiques engendrées par ces procédés :

– le procédé MGC comporte des étapes nécessitant une température de à 500 °C ;

– le procédé isobutène fait mention de températures comprises entre 280 °C et 365 °C.

On pourra donc penser que le procédé isobutène semble à privilégier du point de vue du respect des principes de la chimie verte.

35 › Questions préliminaires

1. $n(\text{hexanedioate de diéthyle}) = \dfrac{\rho(\text{diester}) \cdot V(\text{diester})}{M(\text{diester})}$

$= \dfrac{2{,}0 \times 1{,}0}{202} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol.

L'eau étant introduite en large excès et relativement à la stœchiométrie de la réaction :

$x_{max} = n(\text{diester}) = n(\text{acide adipique formé})$

$= 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol

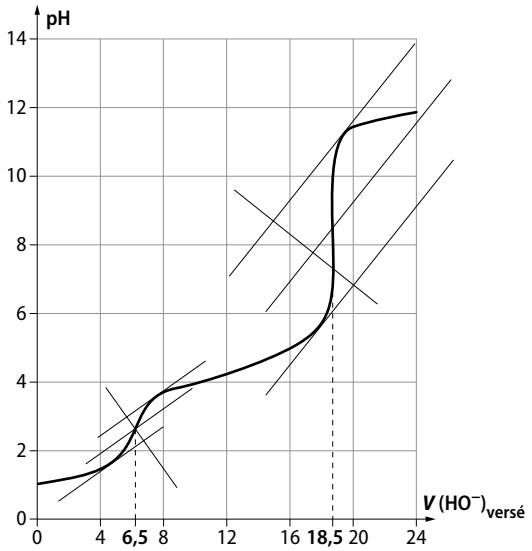
2. En notant AH_2 l'acide adipique :

$AH_2 + 2\ OH^- \rightarrow A^{2-} + H_2O$

› Le problème à résoudre

Pour déterminer le rendement de la synthèse de l'acide adipique, il faut déterminer au préalable l'avancement final de cette réaction, soit la quantité de matière d'acide adipique effectivement présente dans le milieu réactionnel à l'état final de la transformation.

On utilisera pour cela la courbe de titrage (doc. 2), qui permet d'obtenir le volume, puis la quantité de matière de soude ayant réagi avec l'acide adipique présent dans le milieu.



Le volume de soude ayant permis le titrage de l'acide adipique formé est égal à :

$V_B = 18{,}5 - 6{,}5 = 12$ mL

À l'équivalence de la réaction de titrage, on peut écrire :

$n(OH^-)/2 = n(\text{acide présent})$

Donc $x_f = n(\text{acide présent}) = \dfrac{[OH^-] \cdot V_B}{2}$

$= \dfrac{12 \times 10^{-3} \times 1{,}50}{2} = 9{,}0 \times 10^{-3}$ mol

Le rendement de la synthèse est donc égal à :

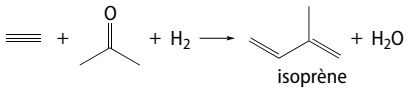
$R = \dfrac{x_f}{x_{max}} \times 100 = \dfrac{9{,}0 \times 10^{-3}}{1{,}0 \times 10^{-2}} \times 100 = 90\ \%$

36 › Questions préliminaires

1. La réaction de l'étape ❷ est une réaction d'addition : une triple liaison est transformée en liaison double.

La réaction de l'étape ❸ est une réaction d'élimination : à partir d'une molécule unique, deux molécules sont formées.

2. L'équation de la réaction de synthèse de l'isoprène est :



› Le problème à résoudre

m(isoprène) = 30 000 t = 30 000 × 10^6 g
L'isoprène, c'est C_5H_8, donc
M(isoprène) = 12,0 × 5 + 1,0 × 8 = 68 g · mol^{-1}.

$$n(\text{isoprène obtenue}) = \frac{m(\text{isoprène})}{M(\text{isoprène})} = \frac{30\,000 \times 10^6}{68}$$
$$= 4{,}4 \times 10^8 \text{ mol}$$

Le rendement s'écrit :

$$R = \frac{n(\text{isoprène obtenue})}{n(\text{isoprène attendue})} \times 100$$

donc

$$n(\text{isoprène attendue}) = \frac{n(\text{isoprène obtenue})}{R} \times 100$$
$$= \frac{4{,}4 \times 10^8}{85} \times 100$$

soit n(isoprène attendue) = 5,2 × 10^8 mol.

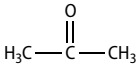
Relativement à la stœchiométrie de la réaction de synthèse :
n(propanone) = n(isoprène attendue)
La propanone ou l'acétone, c'est C_3H_6O, donc :
M(propanone) = 12,0 × 3 + 1,0 × 6 + 16,0 = 58 g · mol^{-1}.
Le volume minimal de propanone nécessaire à la production annuelle d'isoprène est :

$$V(\text{propanone}) = \frac{m(\text{propanone})}{\rho(\text{propanone})}$$
$$= \frac{n(\text{propanone}) \cdot M(\text{propanone})}{\rho(\text{propanone})}$$
$$= \frac{n(\text{isoprène attendue}) \cdot M(\text{propanone})}{\rho(\text{propanone})}$$

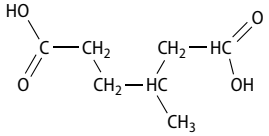
AN : $$V(\text{propanone}) = \frac{5{,}2 \times 10^8 \times 58 \times 10^{-3}}{790}$$

soit V(propanone) = 3,8 × 10^4 m^3.

37 **1. a. B** est la propanone :

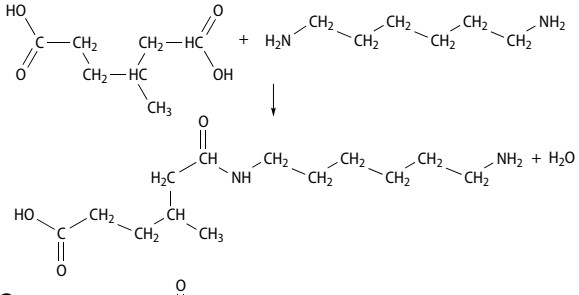


b. C est un diacide carboxylique : l'acide 3-méthylhexan-1,6-dioïque.

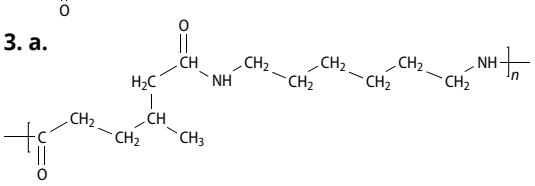


Il est à noter que, lors de l'oxydation par le permanganate de potassium, la fonction carbonyle portée par le citronellal s'oxyde également, en l'occurrence en fonction carboxyle.

2.



3. a.



b. P contient n fois la fonction amide : c'est un polyamide, tout comme le nylon 6,6.

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 230

Une erreur s'est glissée dans le tableau du doc. 3. La densité du 2-chloro-2-méthylbutane est 0,87.

2. Exploitation du résultat obtenu

1. D'après le texte introductif, la réaction entre le 2-méthylbutan-2-ol et l'acide chlorhydrique conduit à la formation de 2-chloro-2-méthylbutane.
Le document 2 nous indique qu'en présence d'un acide, le 2-méthylbutan-2-ol peut également former du 2-méthylbut-2-ène, ainsi que du 2-méthylbut-1-ène produit de façon minoritaire. Un excès de 2-méthylbutan-2-ol peut également être présent.

2. Un test à l'eau de brome ou un test au nitrate d'argent alcoolique mené sur le filtrat confirmeront ou infirmeront la présence du dérivé halogéné ou de l'alcène, mais ne pourront attester de sa pureté. Aussi, afin de déterminer la nature du filtrat et si ce dernier est pur, il convient de calculer sa masse volumique afin d'en déduire sa densité, à comparer avec les données du tableau proposé par le document 3.
Protocole :
• Mesurer la masse d'une éprouvette de 25 mL, propre et sèche.
• Transvaser dans l'éprouvette le filtrat obtenu.
• Relever le volume de filtrat obtenu.
• Sur une balance, mesurer la masse de l'ensemble et en déduire celle du filtrat.
• Calculer la masse volumique du filtrat et en déduire sa densité par rapport à l'eau.
• Conclure quant à la pureté du filtrat.

3. Mise en œuvre du protocole expérimental
Aux incertitudes de mesure près, on constate que la masse volumique du produit obtenu est différente de celle attendue pour le 2-chloro-2-méthylbutane. Le produit obtenu n'est donc pas pur.

CHAPITRE 10

Manuel p. 244

Description d'un mouvement

LE PROGRAMME

1. Décrire un mouvement

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Vecteurs position, vitesse et accélération d'un point.	Définir le vecteur vitesse comme la dérivée du vecteur position par rapport au temps et le vecteur accélération comme la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps. Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées du vecteur position et/ou du vecteur vitesse.
Coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour un mouvement circulaire. Mouvement rectiligne uniformément accéléré. Mouvement circulaire uniforme.	Citer et exploiter les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire. Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne, uniformément accéléré, circulaire, circulaire uniforme. *Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie pour déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération.* **Capacité numérique :** Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, des vecteurs accélération d'un point lors d'un mouvement. **Capacité mathématique :** Dériver une fonction.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 244

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que la notion de vecteur variation de vitesse, vue en 1re, est bien acquise.

› Exemple de réponse attendue

Le vecteur variation de vitesse n'est pas colinéaire à la vitesse. La vitesse change donc de direction. On peut construire ce vecteur au point 4, étant donné les vecteurs $\vec{v}_3$ et $\vec{v}_5$. On trouve ainsi un vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}_4 = \vec{v}_5 - \vec{v}_3$ vertical et dirigé vers le bas.

› En classe de Terminale

La notion de vecteur variation de vitesse sert de base à la définition du vecteur accélération. Le vecteur accélération « remplace » le vecteur variation de vitesse. Ses composantes sont calculées dans un tableur dans l'**activité 1**, à l'aide d'un programme Python dans l'**activité 2**. Il est construit dans les **activités 1 à 3.**

SITUATION 2

Il s'agit de vérifier que la décomposition d'un vecteur dans une base proposée ne pose pas de problème dans un cas simple.

› Exemple de réponse attendue

Le vecteur vitesse représenté a pour expression : $\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ -3{,}2 \end{pmatrix} = -3{,}2\vec{j}$ car il est vertical (pas de composante sur l'axe horizontal) et vers le bas (la composante verticale est de signe négatif).

› En classe de Terminale

Le passage de la représentation vectorielle aux composantes, et réciproquement, permet de mieux comprendre le mouvement. Ainsi, les vecteurs vitesse et accélération sont décomposés dans les **activités 1 et 2.**

SITUATION 3

Il s'agit de vérifier que les différents types de mouvements sont connus.

› Exemple de réponse attendue

Les vecteurs vitesse ont tous la même longueur : le wagon a tout d'abord un mouvement rectiligne uniforme dans la descente, puis un mouvement circulaire uniforme.

› En classe de Terminale

La description du mouvement est un incontournable de la mécanique. Le programme de Terminale revient sur les mouvements rectilignes et circulaires en s'attardant particulièrement sur la mise en équation des mouvements rectilignes uniformes et accélérés, ainsi que les mouvements circulaires uniformes.

Les **activités 1 et 2** associent les mouvements avec les vecteurs vitesse et accélération pour, respectivement, le mouvement rectiligne uniforme et accéléré, puis pour le mouvement circulaire uniforme.

ACTIVITÉS

p. 246

ACTIVITÉ 1

Étude d'un mouvement

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité a pour objectif de traiter les notions de vecteur vitesse et de vecteur accélération, ainsi que la capacité expérimentale du programme « Réaliser et exploiter une vidéo pour déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération ».

La décomposition des vecteurs vitesse et accélération dans cette activité permet d'étudier le mouvement rectiligne uniformément accéléré et le mouvement rectiligne uniforme. L'étude des vecteurs est double :

– construction vectorielle géométrique ;

– calcul des composantes par dérivation à l'aide d'un tableur ;

Les deux études sont mises en parallèle.

› Mesures et analyse

1. b. • Le mouvement doit être plan pour que les mesures issues d'une vidéo (en 2 dimensions) soient exploitables.

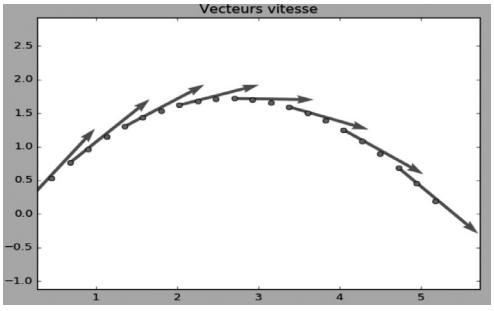
• La caméra (webcam) doit être perpendiculaire au plan du mouvement pour éviter les erreurs de parallaxe.

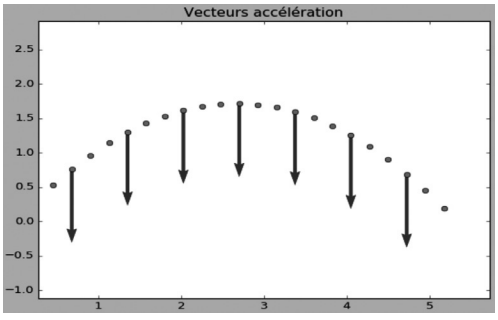
• Le système étudié doit être contrasté par rapport au fond en second plan : le pointage des positions sera plus évident.

• Le système doit avoir une forme géométrique simple pour déterminer facilement son centre. Implicitement, en Terminale, on étudie systématiquement le mouvement du centre de masse des systèmes.

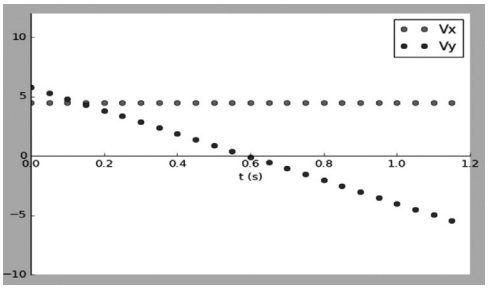
• Sur la vidéo doit figurer une échelle de longueur afin de calibrer les dimensions (transformer les nombres de pixels en longueurs en mètre).

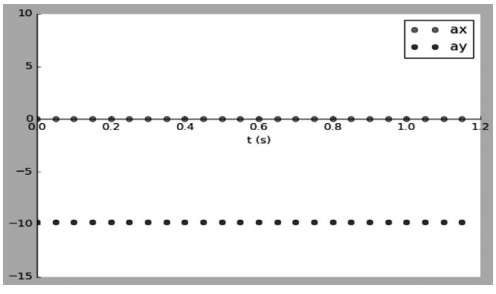
2. Exemple de résultats obtenus :





3.





› Conclusion

Sur l'axe des abscisses, la vitesse est constante (l'accélération est nulle) : le mouvement est uniforme
Sur l'axe des ordonnées, la vitesse varie. L'accélération est constante, le mouvement est uniformément ralenti pour $t < 0{,}6$ s (car la vitesse diminue) puis uniformément accéléré pour $t > 0{,}6$ s.
Le vecteur vitesse a sa composante v_x constante et sa composante v_y positive qui diminue pour $t < 0{,}6$ s. Ainsi, le vecteur, tout d'abord dirigé de façon oblique, vers la droite et le haut, tend à être horizontal. Pour $t > 0{,}6$, sa composante v_y devient négative. Le vecteur vitesse est alors dirigé en bas et à droite.
La composante a_x étant nulle et la composante a_y étant constante et négative, le vecteur accélération est donc constant, vertical et dirigé vers le bas.

p. 247 **ACTIVITÉ 2**

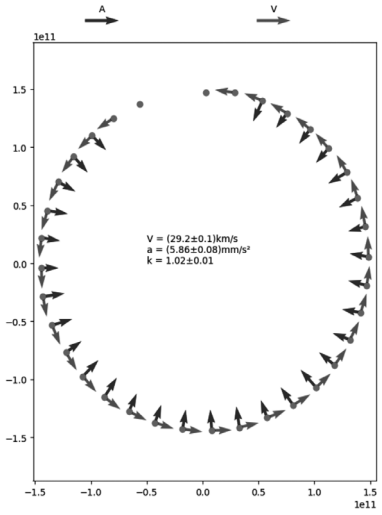
Mouvement de la Terre sur son orbite

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité traite des coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet dans le cas d'un mouvement circulaire. On traite aussi de la capacité numérique du programme : « Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, des vecteurs accélération d'un point lors d'un mouvement ».
L'activité est centrée sur l'exploitation informatisée à travers l'utilisation du langage Python. Il est question de calculer les coordonnées des vecteurs vitesse et accélération à partir de celles du vecteur position et d'établir la relation $a = \dfrac{v^2}{R}$, qui sera présentée dans le cours comme une relation entre les composantes du vecteur vitesse et du vecteur accélération dans le repère de Frenet.

› Mesures et analyse

2. Le programme complet est disponible sur le site enseignant espace-lycee.editions-bordas.fr ainsi que sur le manuel numérique enseignant. On obtient le résultat ci-après.



› Conclusion

La vitesse est systématiquement tangente à la trajectoire et dans le sens du mouvement. L'accélération est, quant à elle, centripète (dirigée vers le centre de la trajectoire). Les deux vecteurs gardent une norme constante au cours du mouvement.
Le mouvement de la Terre est circulaire uniforme. On a trouvé $k = 1$, d'où la conclusion suivante : la relation entre a et v est : $a = \dfrac{v^2}{R}$, où R est le rayon de la trajectoire.

p. 248 **ACTIVITÉ 3**

Descente olympique en bobsleigh

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet d'appliquer les connaissances sur les caractéristiques du vecteur accélération lors de mouvements rectilignes uniforme ou accéléré et circulaire uniforme. Elle réinvestit également la relation entre position, vitesse et accélération.

› Questions préliminaires

1. On part de $d = \dfrac{1}{2}a \cdot t^2$. Si l'on dérive cette expression, dans le cas d'un mouvement rectiligne, on obtient l'expression de la vitesse : $v = a \cdot t$. En dérivant une seconde fois, on obtient l'expression de l'accélération. Cette dernière est constante. Le mouvement est donc uniformément accéléré.

2. a. Si le mouvement était uniformément accéléré, pour parcourir 50 m en 6 s, il faudrait une accélération :

$$a = \frac{2d}{t^2} = \frac{2 \times 50}{6^2} = 2{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

La vitesse devrait alors être :

$v = a \cdot t = 2{,}8 \times 6 = 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

Le mouvement n'est pas uniformément accéléré (on peut imaginer que, sur la fin du mouvement, l'accélération diminue, la vitesse réellement atteinte est donc plus faible)

b. D'après l'échelle donnée sur l'image satellite, le virage de la zone 2 a un rayon d'environ 23 m. On sait que $a = \dfrac{v^2}{R}$ et le document 2 indique que la vitesse est considérée constante, égale à 110 km · h^{-1} dans cette partie. Ainsi, on a :

$$a = \frac{(110 / 3{,}6)^2}{23} = 41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

c. D'après l'échelle, la longueur du freinage est de 20 m. Sur cette longueur, la vitesse passe de 110 km · h^{-1} à 0. On utilise les relations établies à la question 1 pour déterminer celles du mouvement ralenti. La vitesse diminue linéairement en fonction du temps : $v = v_0 - a \cdot t$ et ainsi :

$$d = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

On déduit de cette dernière expression la durée du freinage (seule solution positive de l'équation du second degré précédente) :

$$t = \frac{v_0 + \sqrt{v_0^2 - 2a \cdot d}}{a}$$

Ainsi, puisque $v = v_0 - a \cdot t$, à la fin du freinage :

$$0 = v_0 - a \cdot \frac{v_0 + \sqrt{v_0^2 - 2a \cdot d}}{a}$$

Soit : $0 = v_0 - v_0 + \sqrt{v_0^2 - 2a \cdot d}$.

Ainsi, $0 = \sqrt{v_0^2 - 2a \cdot d}$, soit : $v_0^2 = 2a \cdot d$

Finalement : $a = \dfrac{v_0^2}{2d}$.

$$a = \frac{(110 / 3{,}6)^2}{2 \times 20} = 23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Remarque : Pour obtenir cette relation, il suffisait de considérer que le freinage uniformément ralenti permettant de passer de 110 km · h^{-1} à 0 est exactement symétrique au mouvement rectiligne uniformément accéléré permettant de passer de 0 à 110 km · h^{-1}.

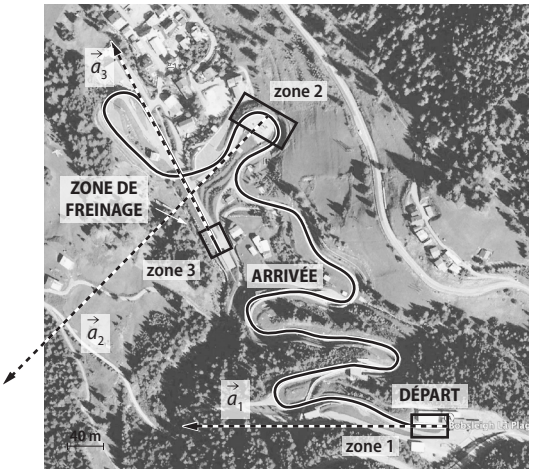
Ainsi, $d = \dfrac{1}{2} a \cdot t^2$ et $v = a \cdot t$.

Soit $t = \dfrac{v}{a}$ et :

$$d = \frac{1}{2} a \left(\frac{v_0}{a} \right)^2 \Leftrightarrow d = \frac{1}{2} \frac{v_0^2}{a} \Leftrightarrow a = \frac{v_0^2}{2d}$$

› Problématique

Échelle : 1 cm ⇌ 8 m · s^{-2}



EXERCICES

Vérifier l'essentiel

p. 253

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la vitesse n'est colinéaire au vecteur position que dans le cas d'un mouvement rectiligne.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le vecteur position n'est pas obtenu en dérivant le vecteur vitesse (c'est l'inverse).
La proposition C est une bonne réponse.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la vitesse n'est colinéaire au vecteur accélération que dans le cas d'un mouvement rectiligne.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le vecteur vitesse n'est pas obtenu en dérivant le vecteur accélération (c'est l'inverse).

3 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la vitesse n'est colinéaire au vecteur accélération que dans le cas d'un mouvement rectiligne.
La proposition C est une bonne réponse.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le repère de Frenet garde des directions constantes uniquement dans le cas d'un mouvement rectiligne, pour lequel $\vec{n}$ est constamment nul.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le repère de Frenet garde des directions constantes uniquement dans le cas d'un mouvement rectiligne, pour lequel $\vec{n}$ est constamment nul.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la composante sur $\vec{\tau}$ du vecteur accélération est fausse : il s'agit ici d'un produit scalaire.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le vecteur accélération a une composante sur $\vec{n}$ et sur $\vec{\tau}$ en général.
La proposition C est une bonne réponse.

6 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le vecteur $\vec{a}$ est nul seulement dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car on sait au moins que les deux vecteurs seront colinéaires et dans la même direction que la trajectoire.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car les deux vecteurs ne sont colinéaires que dans le cas d'un mouvement rectiligne.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le vecteur accélération n'est nul que dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le vecteur accélération n'est nul que dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le vecteur vitesse n'est constant que dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme.
La proposition C est une bonne réponse.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le vecteur accélération est nul dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, dans le cas d'un mouvement rectiligne ralenti, les vecteurs vitesse et accélération sont colinéaires de sens opposés.

Acquérir les bases p. 254

› 1. Les vecteurs du mouvement

10 **1. a.** $\vec{v}_M = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{OM}}{\mathrm{d}t}$

b. $\vec{a}_M = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}_M}{\mathrm{d}t}$

2. a. Cette relation entre les normes est valable dans le cas d'un mouvement rectiligne accéléré. En effet, dans ce cas, les deux vecteurs sont colinéaires.
b. Le vecteur accélération caractérise les variations du vecteur vitesse, c'est-à-dire sa norme, mais aussi son sens et sa direction. La relation proposée (non vectorielle) se présente dans le cas, par exemple, d'un mouvement circulaire.

11 **1. a.** $\vec{v} = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{OM}}{\mathrm{d}t}$, d'où, en dérivant chacune des coordonnées :

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 3{,}39 \\ -9{,}8 \times t + 5{,}87 \end{pmatrix}$$

b. À $t = 1{,}0$ s, on a :

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 3{,}39 \\ -9{,}8 \times 1{,}0 + 5{,}87 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3{,}39 \\ -3{,}93 \end{pmatrix}$$

D'où $v = \sqrt{3{,}39^2 + (-3{,}93)^2}$

$v = 5{,}19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

2. a. $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$

d'où en dérivant chacune des coordonnées :

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ -9{,}8 \end{pmatrix}.$$

b. Ce vecteur est constant, vertical et orienté vers le bas.

c. $a = \sqrt{0 + (-9{,}8)^2} = 9{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

12 **1. a.** $\vec{v}_M = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{OM}}{\mathrm{d}t}$ d'où $\vec{v}_M = (-g \cdot t + v_0)\vec{k}$.

b. Au début du mouvement, l'objet a un mouvement vers le haut : $v_0 > g \cdot t$. Puis t augmente jusqu'à ce que $v_0 = g \cdot t$, soit $t = \dfrac{v_0}{g}$. À ce moment, le vecteur vitesse devient nul. L'instant d'après, $g \cdot t > v_0$: le vecteur vitesse est dirigé vers le bas.

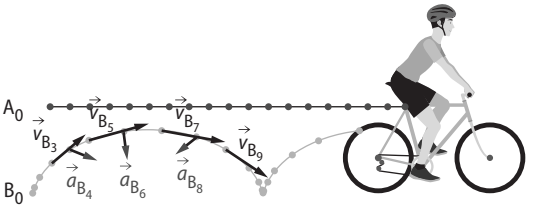
2. $\vec{a}_M = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}_M}{\mathrm{d}t}$ d'où $\vec{a}_M = -g \cdot \vec{k}$.

Il s'agit d'un vecteur vertical, dirigé vers le bas et de norme $g = 9{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

13 **1. a.** Avec l'échelle proposée, on trouve (sur le manuel élève) que la distance parcourue pendant deux intervalles de temps est d'environ 20 cm entre les points A_2 et A_4, entre les points A_7 et A_9, mais également entre les points A_{13} et A_{15} (une mesure sur l'intégralité de l'enregistrement donne une longueur de 19 cm). Ainsi, la vitesse est horizontale, dirigée vers la droite de l'enregistrement et constante.

Sa valeur est : $v_A = \dfrac{19 \times 10^{-2}}{2 \times 20 \times 10^{-3}} = 4{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. Puisque la vitesse est constante et que la trajectoire est rectiligne, alors l'accélération est nulle
2. a et **b.**



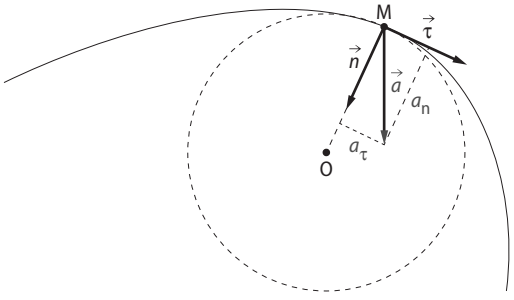
14 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur : pour le graphique* **A**, *l'unité de v est le* $m \cdot s^{-1}$. *Cette erreur a été rectifiée dans le manuel de l'élève et dans les manuels numériques.*
Mouvement uniforme : **B** et **C** (la projection du vecteur position est une fonction linéaire du temps et celle de la vitesse est constante).
Mouvement accéléré : **E** et **A** (la projection du vecteur position croît de plus en plus vite en fonction du temps et celle de la vitesse croît).
Mouvement ralenti : **F** et **D** (la projection du vecteur vitesse décroît et celle de l'accélération est constante).

15 La représentation **A** est incorrecte car la vitesse n'est pas tangente à la trajectoire.
La représentation **B** est incorrecte car l'accélération doit être vers l'intérieur de la courbure.
La représentation **C** est correcte : il s'agit d'un mouvement rectiligne ralenti.
La représentation **D** est incorrecte : si la trajectoire est rectiligne, les vecteurs vitesse et accélération doivent être colinéaires.
La représentation **E** est correcte : il s'agit d'un mouvement curviligne accéléré.
La représentation **F** est incorrecte : si les vecteurs accélération et vitesse sont colinéaires, alors le mouvement doit être rectiligne.

› 2. Le repère de Frenet

16 **1.** Seule la représentation en bas à gauche (**C**) est correcte.
2. La représentation :
– en haut à gauche (**A**) propose un repère de directions fixes pour une trajectoire non rectiligne ;
– en haut à droite (**B**) propose un repère de directions fixes pour une trajectoire non rectiligne ;
– en bas à droite (**D**) propose un vecteur $\vec{n}$ systématiquement vertical et donc pas forcément orthogonal à $\vec{\tau}$.

17 **1.** et **2. a.**



b. La composante a_τ n'est pas nulle. D'après la construction, on a : $\frac{dv}{dt} > 0$.
Le mouvement est accéléré.

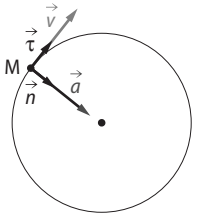
18 **1. a.** Dans le repère de Frenet, l'expression de la vitesse est : $\vec{v} = v\vec{\tau}$.
La composante sur $\vec{\tau}$ est v et la composante sur $\vec{n}$ est nulle.
b. Le mouvement est accéléré : la composante sur $\vec{\tau}$ augmente et la composante sur $\vec{n}$ reste nulle.
2. a. Dans le repère de Frenet, l'expression du vecteur accélération est :

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} + \frac{v^2}{R}\vec{n} \text{ soit : } \vec{a}\begin{pmatrix} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{R} \end{pmatrix}.$$

b. Le mouvement est uniformément accéléré, donc la composante sur $\vec{\tau}$ est constante et la composante sur $\vec{n}$ augmente.

19 **1.** $\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} + \frac{v^2}{R}\vec{n}$
2. a. La vitesse diminue au cours du temps car, par identification :
$\frac{dv}{dt} = -6{,}50$ SI.
b. On a $\frac{v^2}{R} = 106{,}0$ SI avec $v = 40$ SI.
Ainsi, $R = \frac{40^2}{106} = 15{,}1$ m.

20 **1.** *Il est précisé, dans le manuel élève et les manuels numériques, qu'on étudie un point situé à la périphérie du manège.*



2. a. $v = \frac{p}{T}$, où p est le périmètre du cercle ($p = 2\pi \times R$) et T la période de rotation.
Ainsi, $v = \frac{\pi \times 16}{2{,}4} = 20{,}9$ m · s^{-1}.
b. Dans la base de Frenet :

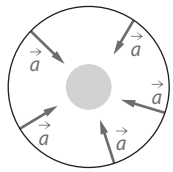
$$\vec{v}\begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}, \text{ soit } \vec{v}\begin{pmatrix} 20{,}9 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{et } \vec{a}\begin{pmatrix} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{R} \end{pmatrix}, \text{ soit } \vec{a}\begin{pmatrix} 0 \\ 54{,}8 \end{pmatrix}.$$

3. Si le point M est à $R = 4$ m, on a les valeurs suivantes :

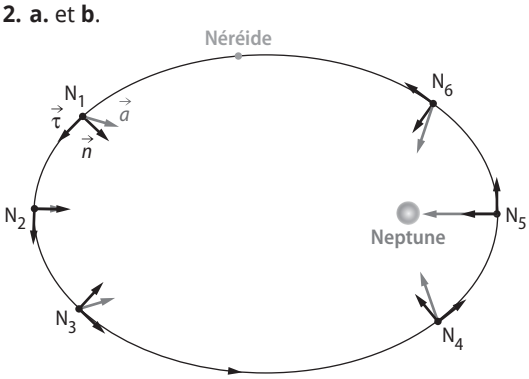
$\vec{v} = \begin{pmatrix} 10{,}5 \\ 0 \end{pmatrix}$ et $\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ 27{,}4 \end{pmatrix}$.

21 **1. a.** Si le vecteur accélération est dirigé vers Neptune, alors il est radial :



b. Dans le repère de Frenet, le vecteur accélération n'a de composante que selon $\vec{n}$. Ainsi, puisque la composante sur $\vec{\tau}$ est nulle, $\frac{dv}{dt} = 0$. Le mouvement est donc uniforme.

2. a. et **b**.



La vitesse de Néréide augmente en N_3 et N_4, diminue en N_1 et N_6 et reste constante en N_5 et N_2, d'après la composante a_τ du vecteur accélération sur le repère de Frenet.

c. On peut imaginer que, pour tous les points compris depuis N_2 jusqu'à N_5, le mouvement est accéléré et, depuis N_5 jusqu'à N_2, le mouvement est ralenti. On peut en déduire que l'apside correspond au point N_5 (où la vitesse est la plus importante) et la périapside au point N_2 (où la vitesse est la plus faible).

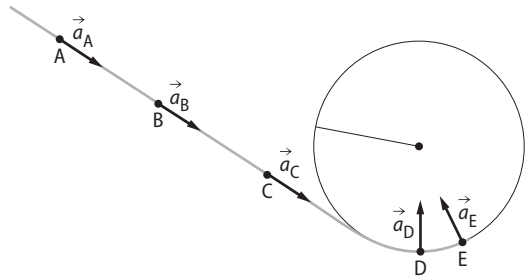
› 3. Mouvements particuliers

22 **1.** Dans le cas d'un mouvement rectiligne, les vecteurs vitesse et accélération sont colinéaires et ont la même direction que la trajectoire.

2. a. Pour une trajectoire rectiligne uniforme, le vecteur accélération est nul. Pour une trajectoire circulaire uniforme, le vecteur accélération est orthogonal au vecteur vitesse.

b. Dans les deux cas, on a : $\vec{v} \cdot \vec{a} = 0$.

23 Le vecteur accélération est constant en A, B et C. Le vecteur accélération est centripète en D et E.



24 **1. a.** Le mouvement d'un point à la surface de l'équateur est circulaire uniforme.

b. Le périmètre de la Terre à l'équateur est :

$p = 2\pi \cdot R = 2 \times \pi \times 6{,}4 \times 10^6$
$= 4{,}0 \times 10^7$ m.

La vitesse est $v = \frac{p}{T}$ avec $T = 24$ h.

D'où $v = \frac{4{,}0 \times 10^7}{24 \times 60 \times 60} = 4{,}7 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
$= 1{,}7 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

c. Pour un mouvement circulaire uniforme, $a = \frac{v^2}{R}$.

Dans ce cas : $a = \frac{(4{,}7 \times 10^2)^2}{6{,}4 \times 10^6} = 3{,}4 \times 10^{-2}$ m · s^{-2}.

Le vecteur accélération est radial et centripète (dirigé vers le centre de la Terre). Avec le repère de Frenet, son expression vectorielle serait :
$\vec{a} = 3{,}4 \times 10^{-2}\, \vec{n}$.

2. Les deux valeurs sont très différentes. L'accélération de la pesanteur, presque 300 fois plus intense, est essentiellement due, en réalité, à la force gravitationnelle. L'accélération calculée à la question **1** est due au mouvement de rotation de la Terre et sa contribution est faible.

25 **1.** et **2.**

1er schéma :

Type de mouvement rectiligne	accéléré	uniforme	ralenti
Vecteur accélération	uniforme, dans l'axe de la pente, vers le bas	nul	uniforme, dans l'axe de la pente, vers le bas

2e schéma :

Type de mouvement rectiligne	accéléré	uniforme	ralenti
Vecteur accélération	uniforme, dans l'axe de la pente, vers le bas	nul	uniforme, dans l'axe de la pente, vers le bas

3e schéma :

Type de mouvement rectiligne	accéléré	uniforme
Vecteur accélération	uniforme, dans l'axe de la pente, vers le bas	nul

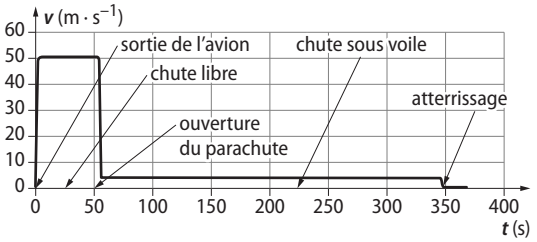
3. a. Les clochettes sont régulièrement espacées sur les parties horizontales. Les distances parcourues sont égales pendant des durées identiques. Cela signifie que le mouvement est uniforme dans cette partie.
b. Dans la réalité, les frottements ralentissent le mouvement. La vitesse diminue légèrement, en réalité, dans les parties horizontales.

26 **1.** $a = \frac{v^2}{R}$ pour un mouvement circulaire uniforme.

2. $v = \sqrt{R \cdot a} = \sqrt{7{,}5 \times 9 \times 9{,}8}$
$= 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3. Le périmètre est :
$p = 2 \times \pi \times R = 2 \times \pi \times 7{,}5$
$= 47$ m.
La période de rotation est : $T = \frac{p}{v} = \frac{47}{26} = 1{,}8$ s.

27 **1.**



2. Sortie de l'avion : mouvement rectiligne accéléré.
Chute libre : mouvement rectiligne uniforme.
Ouverture du parachute : mouvement rectiligne ralenti.
Chute sous voile : mouvement rectiligne uniforme.
Atterrissage : mouvement rectiligne ralenti.

3.

Phase	Sortie de l'avion	Chute libre	Ouverture du parachute	Chute sous voile	Atterrissage
Vecteur vitesse	↓	↓	↓	↓	↓
Vecteur accélération	↓	Vecteur nul	↑	Vecteur nul	↑

Faire le point avant d'aller plus loin p. 257

◗ ***Quelles sont les expressions des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet ?***
Le vecteur vitesse a pour expression :
$\vec{v} = v\vec{\tau} = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}$
Le vecteur accélération a pour expression :
$\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} + \frac{v^2}{R}\vec{n} = \begin{pmatrix} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{R} \end{pmatrix}$

◗ ***Décrire le vecteur accélération dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme.***
Le vecteur accélération est radial (dirigé vers le centre de la trajectoire) et de norme constante :
$a = \frac{v^2}{R}$

◗ ***Quelle est la relation entre le vecteur vitesse et le vecteur accélération ?***
La relation est : $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$

◗ ***Quelle est la relation entre le vecteur position et le vecteur vitesse ?***
La relation est : $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$

◗ ***Quelles sont les relations entre les coordonnées du vecteur position et les coordonnées du vecteur vitesse ?***
Les relations sont : $v_x = \frac{dx}{dt}$; $v_y = \frac{dy}{dt}$; $v_z = \frac{dz}{dt}$

◗ ***Décrire le vecteur accélération dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme et rectiligne accéléré.***
Dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme, le vecteur accélération est nul : $\vec{a} = \vec{0}$.
Dans le cas d'un mouvement rectiligne accéléré, le vecteur accélération est colinéaire au vecteur vitesse $\vec{v}$ et de même sens.

Exercices similaires aux exercices résolus p. 258 et 259

29 **1.** À $t = 0$, $\vec{v} = \frac{L}{2} \cdot \sin(6{,}28 \times 0)\vec{\tau} = \vec{0}$.

2. On remarque que $6{,}28 = 2\pi$.
a. Entre 0 et 0,5 s, la norme de la vitesse augmente ($\sin\theta$ est croissant pour $\theta \in [0 ; \pi/2]$) puis diminue ($\sin\theta$ est décroissant pour $\theta \in [\pi/2 ; \pi]$) : le mouvement est circulaire accéléré, puis circulaire ralenti. Le sens du vecteur vitesse reste le même pendant tout le mouvement.
b. Entre 0,5 s et 1 s, la norme de la vitesse augmente puis diminue : le mouvement est circulaire

accéléré puis circulaire ralenti. Le sens du vecteur vitesse reste le même pendant tout le mouvement entre 0,5 et 1 s, mais il est opposé à ce qu'il était entre 0 s et 0,5 s.

c. La balançoire met 1 s pour faire l'aller-retour, ce qui correspond à la période des oscillations.

3. a. Dans le repère de Frenet, le vecteur accélération s'écrit :

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \dfrac{dv}{dt} \\ \dfrac{v^2}{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{6{,}28 \times L}{2}\cos(6{,}28 \times t) \\ \dfrac{L \cdot \sin^2(6{,}28 \times t)}{4} \end{pmatrix}$$

b. Puisque $\dfrac{dv}{dt} \neq 0$, alors le mouvement n'est pas uniforme.

31 **1.** $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$ et le mouvement est rectiligne sur le plan incliné, d'où $v = 2{,}2 - k \cdot t$.
On vérifie qu'à $t = 0$, $v = 2{,}2$ m · s^{-1}.
De plus, $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$, d'où $a = k$. L'accélération est bien constante et, ainsi, $k = 4{,}9$ m · s^{-2}. Le signe négatif signifie que le vecteur accélération est dirigé vers le bas de la pente, alors qu'Ambre a un mouvement vers le haut de la pente.

2. a. $v = 0 \Leftrightarrow 2{,}2 - k \cdot t = 0$, soit :

$$t = \frac{2{,}2}{k} = \frac{2{,}2}{4{,}9} = 0{,}45 \text{ s.}$$

b. À $t = 0{,}45$ s :

$$d = 2{,}2 \times t - \frac{1}{2}k \cdot t^2$$
$$= 2{,}2 \times 0{,}45 - \frac{1}{2} \times 4{,}9 \times 0{,}45^2$$
$$= 0{,}49 \text{ m} = 49 \text{ cm}$$

3. Ambre n'atteint pas le haut du tremplin. Arrivée en haut de sa trajectoire, elle redescend le long de la pente. L'accélération n'ayant pas changé, la durée de la descente sera la même que celle de la montée, soit $t = 0{,}45$ s. La vitesse atteinte en bas de la pente est également identique : $v = 2{,}2$ m · s^{-1}.

S'entraîner pour maîtriser p. 260

32 **1.** L'accélération subie est :

$$a = \frac{500}{1{,}33 \times 60} = 6{,}27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

2. On a $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$ d'où $v = a \cdot t$. La vitesse est nulle à $t = 0$ et augmente linéairement : $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$.
Il s'agit bien d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré.

3. a. La deuxième phase ne dure que 0,67 min, soit : $\Delta t_2 = 60 \times 0{,}67 = 40{,}2$ s, et la vitesse passe de 500,0 m · s^{-1} à 2 000 m · s^{-1}, soit une variation de vitesse de 1 500 m · s^{-1}.

Ainsi, $a_2 = \dfrac{1\,500}{40{,}2} = 37{,}3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. L'accélération dans la deuxième phase est beaucoup plus importante que dans la première : elle n'est donc pas constante au cours du temps. Le mouvement n'est pas uniformément accéléré.

33 **1. a.**

$$v_M = \sqrt{(-4{,}8 \times \sin(5{,}0 \times t))^2 + (4{,}8 \times \cos(5{,}0 \times t))^2}$$
$$= 4{,}8 \times \sqrt{(\sin(5{,}0 \times t))^2 + (\cos(5{,}0 \times t))^2}$$
$$= 4{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

car $(\cos(x))^2 + (\sin(x))^2 = 1$.

b. Le mouvement est circulaire (d'après l'énoncé) et uniforme (car v_M est une constante).

2. $\vec{a}_M = \dfrac{d\vec{v}_M}{dt}$ d'où :

$$\vec{a}_M = -24 \times \cos(5{,}0 \times t)\vec{i} - 24\sin(5{,}0 \times t)\vec{j}$$

3. a. Par identification, on trouve $\vec{v}_M = 4{,}8\vec{\tau}$.

b. On sait que dans le repère de Frenet, $\vec{v}_M = v\vec{\tau}$, d'où : $v = 4{,}8$ m · s^{-1}.

c. Par identification : $\vec{a}_M = 24\vec{n}$.

d. On sait que $\vec{a} = \dfrac{dv}{dt}\vec{\tau} + \dfrac{v^2}{R}\vec{n}$.
Or, ici, v est constant.
Ainsi, $\dfrac{v^2}{R} = 24$ m · s^{-2}, d'où :

$$R = \frac{v^2}{24} = \frac{4{,}8^2}{24} = 0{,}96 \text{ m}$$

34 **› Démarche experte**

Voir démarche avancée.

› Démarche avancée

1. a. La période correspond au temps nécessaire pour décrire le périmètre, soit :

$$v = \frac{p}{T} = \frac{2\pi R}{T}$$

b. T est constant (33 tours par minute), et comme R diminue au cours du mouvement, v diminue. Le mouvement est donc ralenti.

2. a. La composante radiale de l'accélération est selon $\vec{n}$: $a_n = \dfrac{v^2}{R}$

b. Si le mouvement était uniforme, a_n augmenterait au cours du temps, car R diminue.

c. $a_n = \dfrac{v^2}{R} = \dfrac{4\pi^2 \cdot R^2}{R \cdot T^2} = \dfrac{4\pi^2 \cdot R}{T^2}$.
Ainsi, a_n diminue au cours du temps.

d. L'accélération est plus importante lorsque le saphir est loin de l'axe. Ainsi, c'est au début de la

lecture, quand il est loin de l'axe, que le saphir a le plus de risque de sortir du sillon.

35 **1.** Dans la phase de descente, entre les points A et B, la vitesse de Loucas augmente : le mouvement est rectiligne accéléré. Entre les points B et C, sa vitesse diminue, donc le mouvement est ralenti.
2. a. Entre A et B, le vecteur accélération est le long de l'axe du câble, dirigé vers le bas. Loucas a donc un mouvement rectiligne uniformément accéléré. Entre les points B et C, le vecteur accélération est le long de l'axe du câble, dirigé vers le bas. Loucas a donc un mouvement rectiligne uniformément ralenti. Les deux vecteurs accélération n'ont pas la même norme : $a_{AB} > a_{BC}$ d'après la formule donnée, car $\alpha > \beta$.
b. Le gain de vitesse entre les points A et B n'est pas compensé par la perte de vitesse entre B et C. Ainsi, la vitesse en C n'est pas nulle.

36 **1. a.** Le maillon a un mouvement circulaire uniforme au contact d'un disque.
b. Lorsqu'il n'est pas au contact d'un disque, le maillon a un mouvement rectiligne uniforme.
2. a. $a_n = \dfrac{v^2}{R} = \dfrac{0{,}63^2}{2{,}55 \times 10^{-2}} = 15{,}6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
b. Le plateau a un rayon plus important, l'accélération est donc plus petite (car v est constant).
c. Le fait que l'accélération soit non nulle ne signifie pas que le mouvement soit non uniforme. L'accélération décrit ici la variation du vecteur vitesse : dans un mouvement de rotation, ce dernier change de direction.

37 **1.** Un véhicule roulant à vitesse constante a un mouvement uniforme (supposé rectiligne, mais pas forcément) alors que, lors de la chute d'un immeuble, le mouvement est rectiligne accéléré.
2. a. $\vec{a}_M = \dfrac{d\vec{v}_M}{dt}$
b. Puisque a est constant : $a = g$. Donc $v = g \cdot t + C$, où C est une constante d'intégration. Comme v est nul à $t = 0$, on en déduit que $C = 0$. Ainsi, $v = g \cdot t$.
c. Pour atteindre la vitesse de 80 km · h^{-1}, il faudra une durée :
$t_{chute} = \dfrac{v}{g} = \dfrac{80 / 3{,}6}{9{,}8} = 2{,}3 \text{ s}$
3. a. $\vec{v}_M = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$
b. Si $d = \dfrac{1}{2} g \cdot t^2$, alors $v = g \cdot t$, ce que l'on avait trouvé à la question **2. b**.
c. L'objet en chute libre parcourt la distance :
$d = \dfrac{1}{2} \times 9{,}8 \times 2{,}3^2 = 26 \text{ m}$

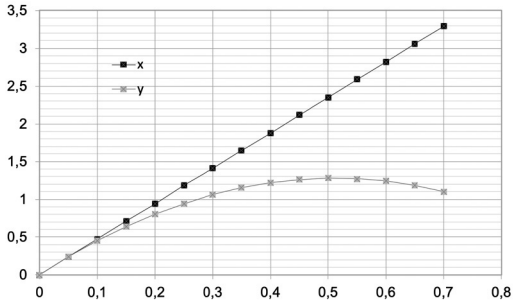
La hauteur d'un étage et l'incertitude fournie permettent de calculer, pour chaque proposition, un intervalle de hauteur correspondant :

Nombre d'étages	3	6	9	12
Intervalle de hauteur correspondant	entre 7,8 m et 12 m	entre 15,6 m et 24 m	entre 23,4 m et 36 m	entre 31,2 m et 48 m

Cela correspond donc à 9 étages (réponse C).

38 ***London Eye***
Le London Eye, la plus grande roue d'observation d'Europe, est une attraction sur la rive sud de la Tamise à Londres. La roue a un diamètre de 120 m (394 pieds). Elle tourne à 26 cm (10 pouces) par seconde (environ 0,9 km · h^{-1} ou 0,6 mile par heure). En conséquence, un tour prend environ 30 minutes. La rotation est suffisamment lente pour permettre aux passagers de monter et descendre sur les capsules en mouvement au niveau du sol sans arrêter le mouvement de la roue.
1. *Calculer la durée réelle d'une rotation complète.*
2. *Comment qualifier le mouvement de la roue ?*
3. *Calculer l'accélération tangentielle et l'accélération radiale d'une capsule.*
1. $T = \dfrac{2\pi \cdot R}{v} = \dfrac{2 \times \pi \times 60}{0{,}26} = 1\,450 \text{ s} = 24 \text{ min}$
2. La roue a un mouvement circulaire uniforme.
3. $a_\tau = 0$ car le mouvement est uniforme.
$a_n = \dfrac{v^2}{R} = \dfrac{0{,}26^2}{60} = 1{,}1 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

39 **1.** Avec le tableur, on obtient :

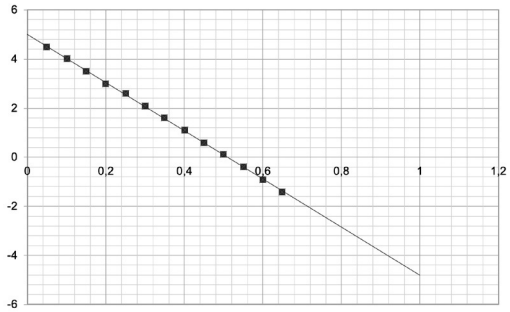


2. a. La représentation de $x(t)$ est linéaire.
b. Le mouvement est donc uniforme sur l'axe de abscisses.
3. a.

t (s)	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
v_y (m · s^{-1})		4,5	4	3,5	3	2,6	2,1

t (s)	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
v_y (m · s^{-1})	1,6	1,1	0,6	0,1	– 0,4	– 0,9	– 1,4	

Avec le tableur, on obtient :



b. Il s'agit d'un mouvement ralenti jusqu'à $t \approx 0{,}5$ s car la norme du vecteur vitesse diminue, puis accéléré car la norme de la vitesse augmente.

4. Les constantes sont v_x, la vitesse horizontale et a_y, l'accélération verticale.
$v_x = 4{,}7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: c'est le coefficient directeur de la droite $x(t)$.
$a_y = -9{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$: c'est le coefficient directeur de la droite $v_y(t)$.

40 **1. a.** Le mouvement de chute est uniformément accéléré.
b. $v = a \cdot t = 10 \times 15 = 150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. a. Le mouvement est en réalité uniforme : la vitesse est constante.
b. Le mouvement est vertical :

$$a_M = \frac{\Delta v_M}{\Delta t} = \frac{50}{0{,}1} = 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

c. 9 *g* correspond à environ $90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. L'accélération subie par Anakin semble donc impossible à supporter.

41 **Exemple d'exposé oral**
D'après le texte, la vitesse angulaire se définit par $\omega = \frac{\theta}{\Delta t}$, où θ est l'angle parcouru pendant la durée Δt. Le mouvement est uniforme, donc $\omega = \frac{2\pi}{T}$ avec T, période de rotation : c'est la durée nécessaire pour 1 tour complet, soit 2π radians.
Or $v = \frac{p}{T} = \frac{2\pi \cdot R}{T} = \omega \cdot R$.
De plus, on sait que, dans un mouvement circulaire uniforme, $a_n = \frac{v^2}{R}$. En rassemblant les deux expressions, on trouve : $a = R \cdot \omega^2$
On observe ainsi que la représentation graphique de a en fonction de ω est une parabole et que la représentation de a en fonction de ω^2 est une droite (de coefficient directeur $R \approx 8$ cm sur le graphique), ce qui correspond à la réalité.

42 **Exemple d'exposé oral**
Un manège tourne à vitesse constante. Les points du manège ont une vitesse constante $v = \frac{2\pi \cdot R}{T}$, où R est la distance à l'axe de rotation et T la période de rotation. Le vecteur vitesse change de direction au cours du temps. Le vecteur accélération caractérise ce changement de direction. Il est centripète (dirigé vers le centre de la trajectoire) et sa valeur est $a_n = \frac{v^2}{R}$, soit $a_n = \frac{4\pi^2 \cdot R}{T^2}$.
L'accélération d'un point du manège est un vecteur centripète dont la norme dépend de sa distance à l'axe de rotation et de la période de rotation.

Développer ses compétences p. 263

43 **› Questions préliminaires**
1. On applique la formule du document 2 :

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} = \frac{1{,}67 \times 10^{-27} \times 9{,}8 \times 10^6}{1{,}60 \times 10^{-19} \times 2{,}0}$$
$$= 0{,}051 \text{ m} = 5{,}1 \text{ cm}$$

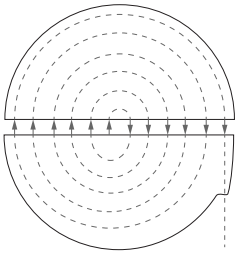
2. Dans la formule donnée, m, q et B sont des constantes au cours du mouvement. Ainsi, si la vitesse augmente, le rayon de la trajectoire augmente linéairement.

3. La longueur d'un demi-cercle est $d = \pi \cdot R$ (demi-périmètre).

$$\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{\pi \cdot R}{v} = \frac{\pi \cdot m \cdot v}{v \cdot q \cdot B}$$
$$= \frac{\pi \cdot m}{q \cdot B}$$

4. $v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{q \cdot E}{m} t + v_0$ et $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{q \cdot E}{m}$.
On retrouve l'expression donnée au document 3. L'expression donnée est donc correcte.

› Le problème à résoudre
Le mouvement se décompose en deux parties :
– rectiligne accéléré dans le champ électrique (entre les « D ») ;
– circulaire uniforme dans le champ magnétique (dans les « D »).
Ainsi, la trajectoire est en forme de spirale :



La vitesse n'augmente que lorsque la particule passe entre les deux « D », sur une distance $L \cdot n$, où n est le nombre de « traversées » (ici, $n = 50$). L'accélération est toujours la même car le champ électrique ne change pas en norme, juste en sens afin de toujours accélérer la particule. Tout se passe comme si la particule avait un mouvement rectiligne uniformément accéléré sur une distance de 50 L.

Comme $v_x = \frac{q \cdot E}{m} t$, d'après la question **4**, alors pour calculer la vitesse en sortie, il faut calculer la durée nécessaire pour parcourir $50\,L = \frac{1}{2} \cdot \frac{q \cdot E}{m} t^2$.

Soit $t = \sqrt{100\,L \cdot \frac{m}{q \cdot E}}$.

Ainsi, $v_x = \frac{q \cdot E}{m} \sqrt{100\,L \cdot \frac{m}{q \cdot E}}$

$= 10 \sqrt{L \cdot \frac{q \cdot E}{m}}$

AN : $v_x = 10 \times \sqrt{1{,}0 \times 10^{-3} \times \frac{1{,}60 \times 10^{-19} \times 1{,}0 \times 10^{7}}{1{,}67 \times 10^{-27}}}$

$v_x = 9{,}8 \times 10^6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

44 › Questions préliminaires

1. Pendant le temps de réaction du conducteur, le mouvement est généralement uniforme.

2. Pendant la distance de freinage, le mouvement est ralenti.

› Le problème à résoudre

Tout d'abord, il faut calculer le temps de réaction Δt. À l'aide des informations fournies dans le document 2, on sait que, à $v = 130\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1} = 36{,}1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, un véhicule parcourt :

$d = \frac{73}{2} = 36{,}5$ m pendant le temps de réaction.

D'où : $\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{36{,}5}{36{,}1} = 1{,}0$ s.

La distance parcourue pendant le temps de réaction à $60\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ est donc :

$d_1 = v \cdot \Delta t = \frac{60}{3{,}6} \times 1{,}0 = 16{,}7$ m

Il faut ajouter à cette distance la distance de freinage d_2, lue graphiquement pour $v = 16{,}7\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$: $d_2 = 20$ m.

La distance totale est donc $d = 37$ m.

45 › Questions préliminaires

Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur au document 4. Il faut lire :

$$\begin{cases} \vec{\tau} = -\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\vec{i} + \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\vec{j} \\ \vec{n} = -\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\vec{i} + \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\vec{j} \end{cases}$$

Cette erreur a été rectifiée sur le manuel de l'élève et sur les manuels numériques.

Par ailleurs, cet exercice est en bleu dans le manuel de l'élève. Sa correction détaillée est disponible pour l'élève sur le site ressources.

1. L'accéléromètre mesurerait l'accélération de la pesanteur. Une valeur constante égale à $9{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ s'ajouterait à la mesure effectuée, selon l'orientation du smartphone (s'il est posé à plat sur une table, par exemple, on mesurerait cette valeur sur l'axe z).

2. On remarque que, lorsque l'un est à un extremum, l'autre est nul et inversement

Les représentations du vecteur accélération toutes les 0,2 s sont fournies dans le tableau ci-dessous :

t (s)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\vec{a}$	↖	↘	↙	↗	↙	↑

› Le problème à résoudre

D'après les constructions des vecteurs accélérations, il semblerait que celui-ci change continuellement de direction. Ce n'est pas un mouvement rectiligne. Cependant, sa composante sur l'axe vertical est toujours nulle, ce qui suggère que le mouvement est plan ou que la vitesse verticale est constante.

La norme du vecteur accélération semble peu varier, compte tenu de la précision des mesures. D'après la correspondance entre les fonctions sinus et cosinus et l'allure des composantes a_x et a_y, on peut supposer que l'accélération n'a qu'une composante selon $\vec{n}$. En effet, si l'on superpose $a_x(t)$ et $a_y(t)$, elles semblent proportionnelles aux composantes cartésiennes du vecteur $\vec{n}$. Tout semble nous amener à la conclusion que le mouvement dans le plan xOy est circulaire, certainement uniforme (bien que la précision des mesures ne permette pas de trancher complètement sur ce dernier aspect). La période de rotation peut même être déduite des mesures : trois périodes durent environ 1,4 s (en respectant l'échelle), d'où $T = 0{,}47$ s.

46

1. $d_B = v_B \cdot t$

2. On a $\vec{v} = \frac{\mathrm{d}\overrightarrow{OM}}{\mathrm{d}t}$ d'où $v = a_a \cdot t$. La vitesse est nulle à $t = 0$ et augmente linéairement :

$\vec{a} = \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$

3. D'après l'énoncé, on a :

$AB_{min} + d_A = d_B + 50$

4. $v = a_a \cdot t$ d'où $t = \dfrac{v_B}{a_a} = \dfrac{25}{3{,}2} = 7{,}8$ s

5. $AB_{min} = -d_A + d_B + 50$

$= \dfrac{-1}{2} a_a \cdot t^2 + v_B \cdot t + 50$

$= -\dfrac{1}{2} \times 3{,}20 \times 7{,}8^2 + 25 \times 7{,}8 + 50 = 147$ m

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 266

Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur. Le titre de la vidéo proposée est : « Mouvement sur un plan incliné » et non « Cuves à ondes ». Cette erreur a été rectifiée sur le manuel de l'élève et les manuels numériques.

1. Proposition de protocole expérimental

Le mouvement enregistré doit avoir lieu dans un plan perpendiculaire à la direction de la caméra.

Afin de pouvoir calibrer l'échelle des distances, on placera une règle ou tout objet de longueur connue au niveau de l'objet (à la même profondeur que l'objet).

La caméra doit être suffisamment éloignée de l'objet afin que la distance entre l'objet et la caméra varie peu au cours du mouvement.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental

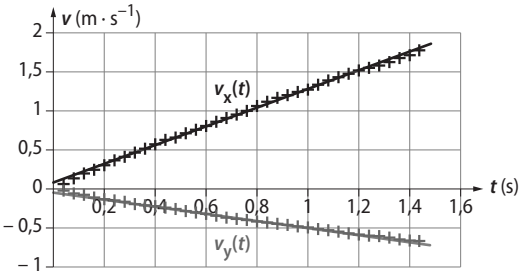
Un exemple de vidéo est disponible sur le site espace-lycee.editions-bordas.fr ainsi que sur le manuel numérique.

3. Exploitation des mesures effectuées

1. Le calcul des composantes de la vitesse se fait en utilisant l'une des formules suivantes :

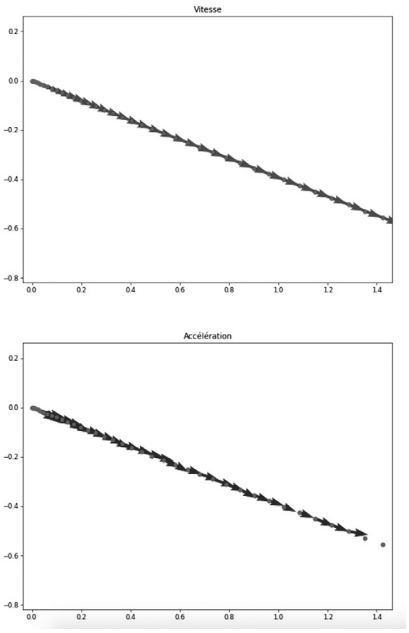
$v_i = \dfrac{x_{i+1} - x_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$ ou $v_i = \dfrac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i}$ sur chacun des points i de l'enregistrement (sauf le premier et le dernier).

Les valeurs moyennes de a_x et a_y s'obtiennent en modélisant les courbes obtenues pour les composantes v_x et v_y de la vitesse au cours du temps : il s'agit des pentes respectives de ces courbes.



2. Le programme complet est disponible sur le site ressources enseignant espace-lycee.editions-bordas.fr et sur le manuel numérique enseignant.

3.



4. Les deux analyses concluent à la même chose : le vecteur accélération est un vecteur constant. Le vecteur vitesse garde une direction et un sens identiques au cours du mouvement mais sa norme augmente. Il s'agit d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré.

CHAPITRE 11

Manuel p. 268

Deuxième loi de Newton

LE PROGRAMME

1. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Deuxième loi de Newton Centre de masse d'un système. Référentiel galiléen. Deuxième loi de Newton. Équilibre d'un système.	Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système, cette position étant donnée. Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié. Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées pour en déduire : – le vecteur accélération du centre de masse, les forces appliquées au système étant connues ; – la somme des forces appliquées au système, le mouvement du centre de masse étant connu.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 268

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis les notions, vues en enseignement de spécialité de 1re, de vecteur vitesse, de vecteur variation de vitesse, de résultante des forces et de 2e loi de Newton approchée.
Dans la situation proposée, il s'agit d'identifier le type des trois phases du mouvement, de déterminer la direction et le sens du vecteur variation de vitesse afin d'en déduire les caractéristiques du vecteur somme des forces. L'approche est qualitative, il n'est pas attendu de calculs.

› Exemple de réponse attendue

On sait que le vecteur somme des forces $\sum \vec{F}$ (ou la résultante des forces) est colinéaire au vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}$.
Lors du curling, il y a trois phases de mouvement.

• Phase 1 : mouvement rectiligne accéléré
La trajectoire est rectiligne et les positions s'écartent de plus en plus, la vitesse augmente, le vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}$ est donc dans la direction et le sens du mouvement.
Le vecteur somme des forces $\sum \vec{F}$ a donc la direction et le sens du mouvement.

• Phase 2 : mouvement rectiligne uniforme
La trajectoire est rectiligne et les positions sont régulièrement espacées, la vitesse est constante, le vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}$ est donc nul. Le vecteur somme des forces $\sum \vec{F}$ est donc également nul, les forces se compensent (1re loi de Newton, ou principe d'inertie).

• Phase 3 : mouvement rectiligne ralenti
La trajectoire est rectiligne et les positions se rapprochent de plus en plus, la vitesse diminue, le vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}$ est donc dans la direction du mouvement et dans le sens opposé. Le vecteur somme des forces $\sum \vec{F}$ a donc la direction du mouvement, mais un sens opposé.

› En classe de Terminale

Les élèves découvriront l'expression générale de la 2e loi de Newton (**activité 3**) qui leur permettra de déterminer :
– le vecteur accélération du centre de masse, les forces appliquées au système étant connues (**activité 4**) ;
– la somme des forces appliquées au système, le mouvement du centre de masse entant connu.

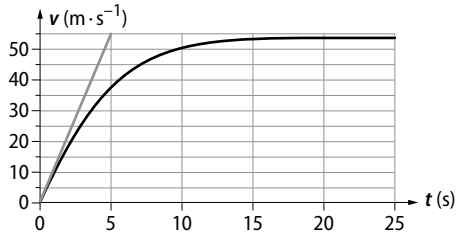
SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien assimilé la relation de l'accélération, qui sera nécessaire pour l'utilisation de la 2e loi de Newton.

› Exemple de réponse attendue

D'après la définition de l'accélération : $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$, d'où $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, c'est-à-dire que l'accélération à une date t correspond à la pente de la tangente à la courbe $v = f(t)$ à la date t.

À la date $t = 0$, $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{55 - 0}{5 - 0} = 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ alors qu'à la date $t = 20$ s, la courbe est horizontale, donc $a = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



› En classe de Terminale

Au chapitre précédent, les élèves ont utilisé cette relation, qui sera nécessaire dans l'application de la 2e loi de Newton (**activités 3 et 4**) et dans les chapitres suivants.

ACTIVITÉS

p. 270 ACTIVITÉ 1

Centre de masse d'un système

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet aux élèves de découvrir une méthode expérimentale de détermination du centre de masse d'un objet et de justifier sa position.

› Exploitation et analyse

1. Il faut veiller à bien être sur la ligne de bascule de l'objet et tracer 3 ou 4 lignes afin d'obtenir l'intersection de ces droites.

2. a. Les centres de masse ne sont pas au même endroit suivant l'objet.

b. Les centres de masse correspondent à la position moyenne de la masse des objets, comme indiqué au doc 1.

3. a. Les trajectoires du centre de masse d'un objet et de l'autre point du système ne sont pas les mêmes.

b. La trajectoire du centre de masse est plus simple que les trajectoires des autres points du système.

› Conclusion

Le centre de masse G d'un système se trouve à la position moyenne des masses du système et correspond au point du système dont la trajectoire est la plus simple.

p. 271 ACTIVITÉ 2

Référentiel galiléen

Commentaires pédagogiques

Cette activité a pour objectif de définir le référentiel galiléen. Depuis la classe de 2de, les élèves entendent parler de cette notion sans savoir ce qu'elle représente. Il est maintenant nécessaire, pour l'application de la 2e loi de Newton, de pouvoir déterminer quels référentiels sont galiléens ou non.

› Exploitation et analyse

1. D'après le doc. 1, les forces qui modélisent les actions mécaniques qui s'exercent sur le mobile autoporteur se compensent.

2. a. Dans le cas du doc. 2, le référentiel d'étude est le référentiel terrestre.

b. Le mouvement est rectiligne uniforme.

3. a. Dans le cas du doc. 3., le référentiel d'étude est le référentiel de la feuille.

b. Le mouvement est curviligne uniforme.

› Synthèse

Dans le cas du doc. 2, le mouvement est rectiligne uniforme et les forces se compensent. Le référentiel terrestre est donc galiléen. Un référentiel est galiléen si le principe d'inertie est vérifié dans ce référentiel (par exemple le référentiel terrestre pour des mouvements de quelques minutes, le référentiel géocentrique pour le mouvement des satellites, le référentiel héliocentrique…).

p. 272 ACTIVITÉ 3

La deuxième loi de Newton

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité permet d'établir la deuxième loi de Newton en complétant celle approchée vue en classe de 1re. L'expression vectorielle de cette loi est

un préalable à la résolution des problèmes qui suivront et aux chapitres suivants. Sa compréhension et son acquisition sont indispensables.
On pourra donner des chariots de masses différentes à chaque groupe de TP afin de confronter les résultats des différents groupes, ou donner les mêmes chariots afin de faire évaluer l'erreur de mesure.

› Exploitation et analyse

2. a. Le chariot est soumis à trois actions mécaniques modélisées par trois forces :

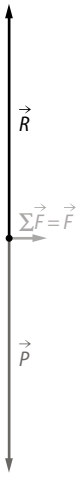
- le poids $\vec{P}$ (direction : verticale ; sens : vers le bas ; valeur : $P = m \cdot g$) ;
- la réaction de la table $\vec{R}$ (direction : verticale ; sens : vers le haut ; valeur : $R = P = m \cdot g$) ;
- le force de traction de la corde $\vec{F}$ (direction : horizontale ; sens : vers la poulie ; valeur : $F = \dfrac{m \cdot m'}{m + m'} g$).

b. Suivant les valeurs des masses m et m', les élèves feront les calculs et traceront les vecteurs avec une échelle adéquate. Les résultats qui suivent ont été obtenus avec $m = 315$ g et $m' = 61$ g.

$P = R = 0{,}315 \times 9{,}8 = 3{,}1$ N

$F = \dfrac{0{,}315 \times 0{,}061}{0{,}315 + 0{,}061} \times 9{,}8 = 0{,}50$ N

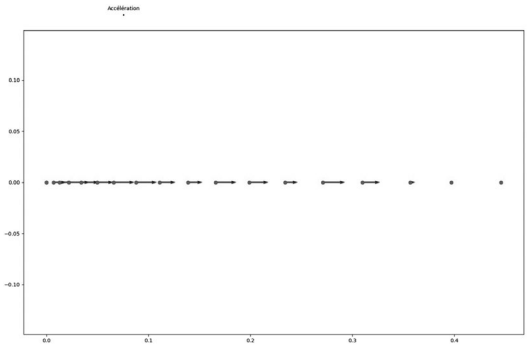
Soit, avec une échelle de 1,0 cm pour 1,0 N, le vecteur représentant $\vec{F}$ mesure 0,5 cm et les vecteurs représentant $\vec{P}$ et $\vec{R}$ mesurent 3,1 cm.



c. $\vec{P}$ et $\vec{R}$ se compensant, la résultante des forces correspond à $\sum\vec{F} = \vec{F}$.

3. Le vecteur accélération a la même direction et le même sens que la résultante des forces (horizontale dans le sens du mouvement vers la poulie).

En exécutant le programme Python, on obtient :



Aux erreurs de pointage près, le vecteur accélération est constant.

› Conclusion

Le tableau de valeurs montre que $F = m \cdot a$, aux erreurs de mesures près.

t	x	y	v	a	F
s	m	m	m/s	m/s²	N
0,00	0,00	0,00	0,00	1,7	0,54
0,04	0,00	0,00	0,07	1,7	0,54
0,08	0,007	0,00	0,14	1,7	0,55
0,12	0,013	0,00	0,21	1,7	0,55
0,16	0,022	0,00	0,28	1,7	0,54
0,20	0,034	0,00	0,35	1,7	0,54
0,24	0,050	0,00	0,41	1,7	0,54
0,28	0,066	0,00	0,48	1,7	0,54
0,32	0,088	0,00	0,55	1,7	0,54
0,36	0,111	0,00	0,62	1,7	0,54
0,40	0,139	0,00	0,69	1,7	0,55
0,44	0,166	0,00	0,76	1,7	0,54
0,48	0,199	0,00	0,83	1,7	0,54
0,52	0,234	0,00	0,90	1,7	0,55
0,56	0,271	0,00	0,97	1,7	0,54
0,60	0,310	0,00	1,0	1,7	0,54
0,64	0,357	0,00	1,1	1,8	0,55
0,68	0,397	0,00	1,2	1,7	0,53
0,72	0,446	0,00	1,2	1,7	0,53

Ainsi, dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces modélisant les actions mécaniques exercées sur le système est égale au produit de la masse du système par le vecteur accélération de son centre de masse : $\sum\vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m \cdot \vec{a}_G$.

p. 273 **ACTIVITÉ 4**

Le téléski

Commentaires pédagogiques

Cette activité nécessite d'avoir établi la 2e loi de Newton par le biais de l'activité 3 ou de l'avoir au préalable donnée et expliquée en cours. Elle a pour objectif l'acquisition de la méthode de résolution pour déterminer les caractéristiques de l'accélération du centre de masse d'un système, les forces appliquées au système étant connues.

› Exploitation et analyse

1. a. Le système est {skieuse + équipement} et le référentiel est le référentiel terrestre supposé galiléen.

b. Le système est soumis à quatre actions mécaniques modélisées par quatre forces :

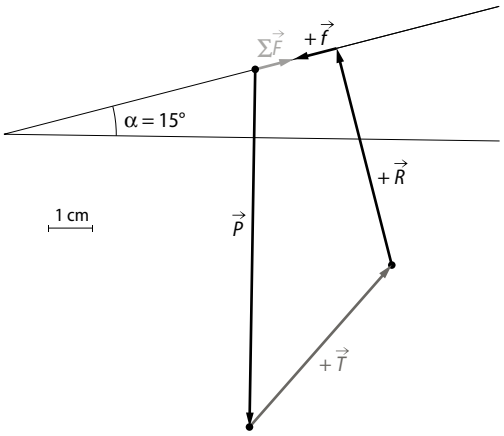
• le poids $\vec{P}$ (direction : verticale ; sens : vers le bas ; valeur : $P = m \cdot g$) ;

• la réaction de la piste $\vec{R}$ (direction : perpendiculaire à la piste ; sens : vers le haut ; valeur : R) ;

• le force de traction de la perche $\vec{T}$ (direction : la perche ; sens : vers la perche ; valeur : T) ;

• les frottements de la neige sur le système $\vec{f}$: (direction : la piste ; sens : opposé au mouvement ; valeur : f).

2. a. et **b.** $P = m \cdot g = 80 \times 9{,}8 = 784$ N $\approx 7{,}8 \times 10^2$ N. En prenant comme échelle 1,0 cm pour 100 N, le vecteur représentant $\vec{P}$ mesure 7,8 cm, $\vec{R}$ mesure 4,9 cm, $\vec{T}$ mesure 4,7 cm et $\vec{f}$ mesure 1,0 cm.



› Conclusion

• *Méthode 1 (privilégiée) :*

D'après la 2e loi de Newton, $\sum\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Le vecteur accélération $\vec{a}$ a même direction et même sens que le vecteur résultante des forces $\sum\vec{F}$ donc, ici, la direction de la pente et comme sens celui du mouvement.

Pour la valeur, on a : $a = \dfrac{\sum F}{m}$. Or $\sum\vec{F}$ mesure 0,80 cm donc, à l'échelle, la valeur de la résultante est de $0{,}80 \times 10^2$ N. Ainsi, $a = \dfrac{0{,}80 \times 10^2}{80} = 1{,}0$ m · s^{-2}.

• *Méthode 2 :*

Si la question 2 n'est pas ou mal réalisée, on peut se servir du document 2 et répondre à la problématique par projection des vecteurs sur les axes ($x'x$) et ($y'y$).

D'après la 2e loi de Newton :

$\sum\vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{T} + \vec{f}$.

Le vecteur $\vec{a}$ est dans la direction de la pente vers le haut, donc orienté suivant ($x'x$).

– Sur ($y'y$) : $R - P \cdot \cos\alpha + T \cdot \sin\beta = 0 = m \cdot a_y$ (inutile ici pour la suite, mais cela permet de vérifier qu'il n'y a pas de mouvement sur cet axe : $a_y = 0$).

– Sur ($x'x$) : $-f - P \cdot \sin\alpha + T \cdot \cos\beta = m \cdot a_x$.

D'où : $a_x = \dfrac{-f - P \cdot \sin\alpha + T \cdot \cos\beta}{m}$

Donc

$$a_x = \frac{-100 - 80 \times 9{,}8 \times \sin 15° + 470 \times \cos 35°}{80}$$
$$= 1{,}0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

La skieuse est soumise à une accélération de 1,0 m · s^{-2} dans la direction de la pente et le sens du mouvement.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel p. 278

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le centre de masse est le point central de toutes les masses.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car il est forcément à la position moyenne de la masse du système.

2 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le point A se situe au sommet du cylindre et non pas au centre.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le point C se situe en bas du cylindre et non pas au centre.

4 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la 1re loi de Newton s'applique dans un référentiel galiléen.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car les 1re et 2e lois de Newton s'appliquent dans un référentiel galiléen.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car un référentiel est galiléen s'il est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel galiléen.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

6 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le mouvement dure trop longtemps pour une étude

dans le référentiel terrestre et la rotation de la Terre sur elle-même ne peut pas être négligée.
La proposition C est une bonne réponse.

7 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car il s'agit d'un système immobile ou en mouvement rectiligne uniforme, donc de la 1re loi de Newton, ou d'un cas particulier de la 2e loi de Newton si le système est à l'équilibre.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le vecteur résultante des forces a la même valeur que le produit de la masse du système par l'accélération.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car si le système est en équilibre, il ne bouge pas, donc son vecteur vitesse est nul.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le système peut avoir un vecteur somme des forces nul mais être en mouvement rectiligne uniforme (d'après la 1re loi de Newton) et donc avoir son vecteur vitesse constant mais non nul.
La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases *p. 279*

› 1. Centre de masse d'un système

10 Le système est homogène, donc son centre de masse est au centre géométrique du système. Le système est un anneau, donc le centre de masse est au centre de l'anneau des cercles, donc G n'est pas sur l'objet.

11 Le centre de masse est au centre du disque car c'est le point qui a la trajectoire la plus simple.

12 **1.** Le point M a une trajectoire curviligne. Le point C a une trajectoire rectiligne.

2. Le point C est le centre de masse car c'est le point du système qui a la trajectoire la plus simple.

13 Le solide est à l'équilibre : les droites d'action des forces sont concourantes au centre de masse, c'est-à-dire le point I.

› 2. Référentiel galiléen

14 Les référentiels courants sont :
– le référentiel héliocentrique, galiléen pour l'étude du mouvement des planètes ;
– le référentiel géocentrique, galiléen pour des mouvements de quelques heures (rotation d'un satellite par exemple) ;
– le référentiel terrestre, galiléen pour des mouvements de quelques minutes (mouvement d'une voiture, d'une fusée, d'un sportif…).

15 **a.** Référentiel terrestre.
b. Référentiel héliocentrique.
c. Référentiel géocentrique.
d. Référentiel terrestre.

16 **1.** Un référentiel est un objet de référence par rapport auquel on étudie un mouvement.

2. Le référentiel est considéré comme galiléen si la 1re loi de Newton s'applique.

3. a. Le référentiel terrestre est considéré comme galiléen si le mouvement étudié dure quelques minutes, ce qui est le cas si on étudie le départ du pilote.
b. Le mouvement au démarrage est un mouvement rectiligne accéléré.
c. D'après la 1re loi de Newton, le pilote n'étant ni immobile ni en mouvement rectiligne uniforme dans ce référentiel galiléen, les actions mécaniques ne se compensent pas.

4. a. Le référentiel voiture n'est pas considéré comme galiléen puisqu'il n'est pas en mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel terrestre.
b. Le pilote est immobile dans ce référentiel.
c. Les actions mécaniques ne se compensent pas, la 1re loi de Newton n'est pas applicable.

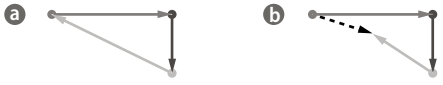
17 **1.** Thomas Pesquet est immobile dans le référentiel de l'ISS, qui peut être considéré comme galiléen puisque la 1re loi de Newton s'applique.

2. L'ISS est en mouvement de rotation autour de la Terre, donc l'ISS n'est pas en mouvement rectiligne uniforme par rapport à la surface de la Terre : le référentiel terrestre n'est donc pas galiléen.

3. De même, l'ISS n'est pas en mouvement rectiligne uniforme par rapport au centre de la Terre, donc le référentiel géocentrique n'est pas galiléen.

› 3. Deuxième loi de Newton

18 **1.** Le vecteur somme des forces (ou résultante des forces) est nul ($\sum \vec{F} = \vec{0}$) pour la situation **a** et correspond au vecteur en pointillés pour la situation **b**.



2. L'accélération du système **a** est nulle, d'après la réponse à la question **1**. Il est alors à l'équilibre si et seulement si son vecteur vitesse $\vec{v}$ est nul.

3. D'après la 2e loi de Newton ($\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$) pour le système **b**, le vecteur accélération a la même direction et le même sens que le vecteur somme des forces, c'est-à-dire le vecteur en pointillés sur le schéma ci-avant.

19 **1. a.** La pierre est à l'arrêt, donc $\vec{v} = \vec{0}$.

Donc $\vec{a} = \dfrac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{0}$ et, d'après la 2e loi de Newton, $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{0}$.

b. Comme $\vec{v} = \vec{0}$ et $\sum \vec{F} = \vec{0}$ le système est à l'équilibre.

2. a. La pierre est en mouvement rectiligne uniforme : $\vec{v} = \overrightarrow{\text{cte}}$.

Donc $\vec{a} = \dfrac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{0}$ et, d'après la 2e loi de Newton, $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{0}$.

b. Comme $\vec{v} \neq \vec{0}$, même si $\sum \vec{F} = \vec{0}$, le système n'est pas à l'équilibre

Remarque : l'exercice peut être résolu avec la 1re loi de Newton.

20 **1.** La piñata est immobile, donc $\vec{v} = \vec{0}$.

On en déduit que $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = \vec{0}$.

2. D'après la 2e loi de Newton, $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

Donc la résultante des forces est : $\sum \vec{F} = \vec{0}$.

3. $\vec{v} = \vec{0}$ et $\sum \vec{F} = \vec{0}$, donc la piñata est à l'équilibre.

21 **1.** D'après le tracé des vecteurs représentant les actions mécaniques exercées sur la boule, les forces modélisant ces actions se compensent, donc $\sum \vec{F} = \vec{0}$.

2. La boule est immobile, d'où $\vec{v} = \vec{0}$ et $\sum \vec{F} = \vec{0}$: elle est donc à l'équilibre.

3. $P = m \cdot g = 0{,}400 \times 9{,}8 = 3{,}9$ N

De plus, le tracé des vecteurs forme un triangle rectangle où $\cos 30° = \dfrac{P}{T}$, d'où $T = \dfrac{P}{\cos 30°}$, soit $T = \dfrac{3{,}9}{\cos 30°} = 4{,}5$ N

$\tan 30° = \dfrac{F}{P}$. D'où :

$F = P \cdot \tan 30° = 3{,}9 \times \tan 30° = 2{,}3$ N

Remarque : on peut aussi utiliser $\sin\left(30°\right) = \dfrac{F}{T}$, d'où :

$F = T \cdot \sin 30° = 4{,}5 \times \sin 30° = 2{,}3$ N

22 **1.** Par construction graphique, on remarque que $\sum \vec{F}$ a une direction verticale et son sens est vers le bas.

2. La valeur du poids est :

$P = m \cdot g = 90 \times 9{,}8 = 8{,}8 \times 10^2$ N

La longueur du vecteur $\vec{P}$ sur le schéma est de 1,5 cm (on prend les dimensions du manuel élève). Or, par construction, $\sum \vec{F}$ mesure 0,6 cm. On a donc :

$8{,}8 \times 10^2$ N $\leftrightarrow$ 1,5 cm

$\sum F \leftrightarrow$ 0,60 cm

Donc, par proportionnalité :

$\sum F = \dfrac{8{,}8 \times 10^2 \times 0{,}60}{1{,}5} = 3{,}5 \times 10^2$ N.

Or, d'après la 2e loi de Newton, $\sum F = m \cdot a$. Donc :

$a = \dfrac{\sum F}{m} = \dfrac{3{,}5 \times 10^2}{90} = 3{,}9$ m · s^{-2}.

23 **1.** D'après le tracé des forces représentant les actions mécaniques exercées sur le bobsleigh, la résultante des forces $\sum \vec{F}$ a une direction horizontale et un sens de la gauche vers la droite.

2. $\vec{P}$ et $\vec{R}$ se compensent, donc :

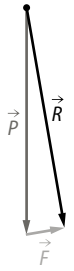
$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F} + \vec{f} = \vec{F} + \vec{f} = m \cdot \vec{a}$

En projetant sur l'axe horizontal :

$\sum F = F - f = 250 - 25 = 225$ N

Donc $a = \dfrac{\sum F}{m} = \dfrac{225}{300} = 0{,}750$ m · s^{-2}.

24 **1.** En prenant comme échelle 1,0 cm pour 100 N, alors $\vec{P}$ est représenté par un vecteur de 3,0 cm, $\vec{F}$ est représenté par un vecteur de 0,52 cm et $\vec{R}$ est représenté par un vecteur de 2,95 cm.



Le vecteur résultante des forces est donc nul : $\sum \vec{F} = \vec{0}$

2. D'après la 2e loi de Newton, $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$, donc $\vec{a} = \vec{0}$.

3. $\sum \vec{F} = \vec{0}$ mais le système est en mouvement sur le tapis roulant, donc $\vec{v} \neq \vec{0}$: il n'est donc pas à l'équilibre mais en mouvement rectiligne uniforme.

25 **1.** $a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t} = \dfrac{v_{\text{finale}} - v_{\text{initiale}}}{\Delta t} = \dfrac{0 - 10}{2{,}0} = -5{,}0$ m · s^{-2}

2. On utilise la 2e loi de Newton ($\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$) dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

3. La résultante des forces $\sum\vec{F}$ a donc la même direction et le même sens que le vecteur accélération $\vec{a}$ (horizontale et de sens opposé au mouvement, ce qu'indique le signe « moins » de la valeur de a) et a une valeur de :
$\sum F = m \cdot a = 200 \times 5{,}0 = 1{,}0 \times 10^3$ N

26 **1.** Pendant les 15 premières secondes, le mouvement est rectiligne accéléré.

2. À la date $t = 2{,}5$ s : $a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t} = \dfrac{22{,}5 - 0}{2{,}5 - 0} = 9{,}0$ m · s^{-2}.

3. a. D'après la 2e loi de Newton, $\sum\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, donc le vecteur résultante des forces $\sum\vec{F}$ a la même direction verticale et le même sens vers le bas que le vecteur accélération $\vec{a}$.
b. $\sum\vec{F} = \vec{P} + \vec{f}$ et $\sum F = m \cdot a$.
D'où, en projetant, $\sum F = P - f$, donc :
$f = P - \sum F = P - m \cdot a = m \cdot g - m \cdot a$
$= m \cdot (g - a)$
Soit $f = 90 \times (9{,}8 - 9{,}0) = 72$ N

Remarque : on peut aussi calculer P et $\sum F = m \cdot a$ puis soustraire, mais il faut faire attention aux chiffres significatifs et aux arrondis.

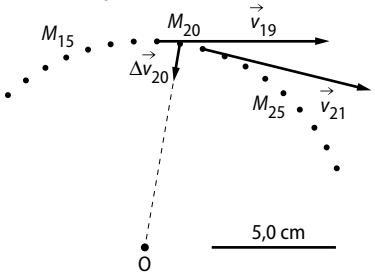
27 **1.** $\vec{a}_{20} = \dfrac{\Delta\vec{v}_{20}}{\Delta t} = \dfrac{\vec{v}_{21} - \vec{v}_{19}}{2\tau}$

Or $\vec{v}_{19} = \dfrac{\overrightarrow{M_{18}M_{20}}}{\Delta t} = \dfrac{\overrightarrow{M_{18}M_{20}}}{2\tau}$ et $\vec{v}_{21} = \dfrac{\overrightarrow{M_{20}M_{22}}}{\Delta t} = \dfrac{\overrightarrow{M_{20}M_{22}}}{2\tau}$

Sur l'enregistrement, $M_{18}M_{20} = M_{20}M_{22} = 0{,}55$ cm (on prend les mesures du manuel élève) et l'échelle mesure 1,45 cm pour 5,0 cm dans la réalité, d'où le fait que $M_{18}M_{20}$ et $M_{20}M_{22}$ mesurent 1,9 cm dans la réalité.

Ainsi $v_{19} = v_{21} = \dfrac{1{,}9 \times 10^{-2}}{2 \times 20 \times 10^{-3}} = 0{,}48$ m · s^{-1}.

Les deux vitesses ont la même valeur mais pas la même direction : il faut donc tracer le vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}_{20}$ pour mesurer sa longueur et déterminer sa valeur.
On représente les vecteurs vitesse et variation de vitesse par une nouvelle échelle : 1,0 cm pour 0,20 m · s^{-1}. Ainsi $\vec{v}_{19}$ et $\vec{v}_{21}$ mesurent 2,4 cm et sont tangents à la trajectoire dans le sens du mouvement.

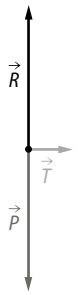


La construction de $\Delta\vec{v}_{20}$ permet de déterminer les caractéristiques de $\vec{a}_{20}$:
– direction : la même que $\Delta\vec{v}_{20}$, c'est-à-dire la direction du fil $\overrightarrow{M_{20}O}$.
– sens : le même que $\Delta\vec{v}_{20}$, de M_{20} au point O de l'axe de rotation.
– valeur : $\Delta\vec{v}_{20}$ mesure 0,50 cm, soit avec l'échelle, $\Delta v_{20} = 0{,}10$ m · s^{-1}, donc :

$a_{20} = \dfrac{0{,}10}{2 \times 20 \times 10^{-3}} = 2{,}5$ m · s^{-2}

Remarque : le mouvement est circulaire uniforme et, pourtant, il y a une accélération : elle correspond à l'accélération normale dans le repère de Frenet (voir le chapitre 10).

2. Le mobile est soumis à 3 actions mécaniques modélisées par les forces suivantes :
• le poids $\vec{P}$;
• la réaction de la table $\vec{R}$;
• la force de tension du fil $\vec{T}$;



3. D'après la 2e loi de Newton :
$\sum\vec{F} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{T} = m \cdot \vec{a}$. Or $\vec{P}$ et $\vec{R}$ se compensent puisque, sans la tension du fil, le mobile est soit immobile, soit en mouvement rectiligne uniforme.
D'où $\vec{T} = m \cdot \vec{a}$ et donc :
$T = 400 \times 10^{-3} \times 2{,}5 = 1{,}0$ N

Faire le point avant d'aller plus loin *p. 281*

Définir le centre de masse d'un système.
Le centre de masse G d'un système est le point où se situe la position moyenne de la masse du corps. Il correspond au point central de toutes les masses constituant le système.

Définir un référentiel galiléen.
Un référentiel est dit galiléen si le principe d'inertie (ou 1re loi de Newton) est vérifié dans ce référentiel.

Écrire la deuxième loi de Newton.
Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces modélisant les actions mécaniques exercées sur le système est égale au produit de la masse du système par le vecteur accélération de son centre de masse :
$\sum\vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m \cdot \vec{a}_G$

◗ ***Écrire les conditions d'un système en équilibre.***
Un système est à l'équilibre dans un référentiel donné si et seulement si le vecteur vitesse du centre de masse est nul et si son accélération est nulle : $\vec{v}_G = \vec{0}$ et $\vec{a}_G = \vec{0}$
D'après la 2e loi de Newton, la résultante des forces est donc nulle : $\sum \vec{F} = \vec{0}$.

◗ ***Expliciter les étapes qui permettent de déterminer les caractéristiques du vecteur accélération du centre de masse d'un système si les forces modélisant les actions mécaniques exercées sont connues.***
• Définir le système et le référentiel d'étude, puis faire le bilan des actions mécaniques qui s'exercent sur le système.
• Représenter, avec une échelle donnée, les forces modélisant ces actions mécaniques en prenant comme origine le centre de masse G et effectuer la somme de ces forces afin de déterminer la résultante des forces $\sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}}$.
• Mesurer la valeur de la résultante et diviser par la masse du système pour déterminer la valeur de l'accélération, la direction et le sens étant donnés par le vecteur résultante.

◗ ***Expliciter les étapes qui permettent de déterminer la résultante des forces modélisant les actions mécaniques exercées sur un système si le vecteur accélération du centre de masse est connu.***
• Déterminer le vecteur accélération soit par construction graphique à l'aide des vecteurs vitesse, soit à l'aide des données (valeurs de vitesses, tableau, graphe...).
• Multiplier la valeur de l'accélération par la masse du système.
• Tracer, avec l'échelle donnée, la résultante des forces et déterminer les caractéristiques d'une des forces à partir des autres forces connues.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 282 et 283

29 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur : la masse totale de la fusée est de 2 900 tonnes et la valeur de g est 9,8 m · s⁻². Cette erreur a été corrigée dans le manuel élève et dans les manuels numériques.*

1. On peut choisir sur le référentiel terrestre supposé galiléen.

2. Poids de la fusée $\vec{P}$;
Force de poussée des réacteurs $\vec{F}$;
Force de frottement de l'air $\vec{f}$.
Le schéma est donné ci-contre.

3. Les frottements étant négligeables, on a $\vec{F} + \vec{P} = M \cdot \vec{a}$ (d'après la 2e loi de Newton) soit, sur l'axe vertical : $F - M \cdot g = M \cdot a$ donc :

$$a = \frac{F}{M} - g = \frac{3{,}3 \times 10^7}{2{,}9 \times 10^6} - 9{,}8 = 1{,}6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

31 **1.** Le vecteur accélération $\vec{a}_G$ a la direction de la pente, comme sens celui du mouvement et a une valeur :

$$a_G = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{72}{3{,}6}\right) - 0}{10} = 2{,}0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

2. En appliquant la 2e loi de Newton au système {automobiliste + voiture}, on a :
$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = M \cdot \vec{a}_G$
Soit, en projetant sur l'axe horizontal :
$-M \cdot g \cdot \sin\alpha + 0 + F = M \cdot a_G$
Donc : $F = M \cdot (a_G + g \cdot \sin\alpha)$

3. $F = 1{,}0 \times 10^3 \times (2{,}0 + 9{,}8 \times \sin(10°)) = 3{,}7 \times 10^3$ N

4. En réalité, il y a des frottements que l'on ne devrait pas négliger.

S'entraîner pour maîtriser

p. 284

32 *Cet exercice est en bleu sur le manuel élève et corrigé pour les élèves sur le site ressources.*

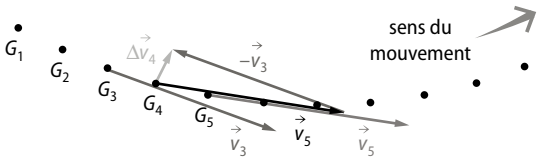
1. Le centre de masse correspond à G car c'est le point central des masses de la sphère, puisque la masse du fil est considérée comme négligeable. G est donc au centre géométrique de la sphère.

2. Pour déterminer les caractéristiques de $\vec{a}_4$ il nous faut tracer $\vec{v}_3$ et $\vec{v}_5$.
Pour cela, on calcule :

$$v_3 = \frac{G_2G_4}{2\tau} = \frac{3{,}3 \times 10^{-2}}{2 \times 30 \times 10^{-3}} = 0{,}55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_5 = \frac{G_4G_6}{2\tau} = \frac{3{,}6 \times 10^{-2}}{2 \times 30 \times 10^{-3}} = 0{,}60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Les vecteurs vitesse étant tangents à la trajectoire, on peut tracer à l'échelle :



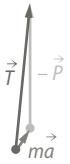
On mesure $\Delta v_4 = 0{,}11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Donc $a_4 = \frac{\Delta v_4}{2\tau} = \frac{0{,}11}{2 \times 30 \times 10^{-3}} = 1{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

La direction et le sens de $\vec{a}_4$ sont ceux de $\overrightarrow{\Delta v_4}$.

3. D'après la 2e loi de Newton : $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}_G$.
D'où $\vec{P} + \vec{T} = m \cdot \vec{a}_G$ donc $\vec{T} = m \cdot \vec{a}_G - \vec{P}$.

Or $m \cdot a_G = 236 \times 10^{-3} \times 1{,}8 = 0{,}43$ N.
et $P = m \cdot g = 236 \times 10^{-3} \times 9{,}8 = 2{,}3$ N, $\vec{P}$ étant vertical et vers le bas.
Avec une échelle de 1,0 cm pour 1,0 N, le vecteur $m \cdot \vec{a}$ mesure 0,43 cm dans la direction de $\overrightarrow{\Delta v_4}$ et $-\vec{P}$ mesure 2,3 cm (vertical mais vers le haut). On mesure alors la longueur du vecteur $\vec{T}$ et on détermine la valeur de la tension du fil grâce à l'échelle.



La tension du fil est dans la direction du fil, vers le point O et a pour valeur 2,7 N.

33 *Cet exercice est en bleu sur le manuel élève et corrigé pour les élèves sur le site ressources.*
1. Le système est {voiture}, étudié dans le référentiel terrestre galiléen.

2. Le mouvement est horizontal accéléré, donc le vecteur accélération $\vec{a}$ a une direction horizontale, comme sens celui du mouvement et pour valeur :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{120}{3{,}6}\right) - 0}{7{,}0} = 4{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

3. D'après la 2e loi de Newton :
$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F} + \vec{f} = m \cdot \vec{a}$
En projetant sur l'axe horizontal :
$F - f = m \cdot a$ donc :
$F = m \cdot a + f = 1\,000 \times 4{,}8 + 1\,500$
$= 6{,}3 \times 10^3$ N

34 ***Ascenseur***
Un ascenseur de masse totale m = 400 kg, initialement immobile, est tiré par un câble vertical avec une force de 5 000 N et monte alors depuis le rez-de-chaussée.
1. *Quel est le référentiel d'étude ?*
2. *Comment qualifier le mouvement dans ce référentiel ?*
3. *Donner les caractéristiques du vecteur accélération.*

1. C'est le référentiel terrestre.
2. Le mouvement est rectiligne accéléré verticalement.
3. Le vecteur accélération a donc une direction verticale, et comme sens vers le haut.

35 **1.** On étudie le mouvement dans le référentiel terrestre galiléen.

2. La vitesse initiale est $v(0) = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

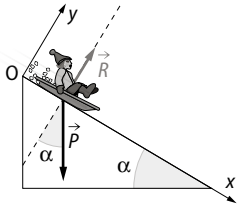
3. a. La courbe représentant $v = f(t)$ est une fonction affine du type $v = m \cdot t + p$.

Comme $a = \frac{dv}{dt}$, l'accélération correspond donc au coefficient directeur de la droite.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{3{,}0 - 2{,}0}{1{,}0 - 0{,}0} = 1{,}0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

b. Le vecteur $\vec{a}$ est dans la direction de la pente, c'est-à-dire l'axe (Ox), et dans le sens de la pente, c'est-à-dire vers les x croissants.

4. a. Les frottements de la piste et de l'air étant négligés, le système est soumis aux actions de la Terre, modélisées par le poids $\vec{P}$, et à la réaction de la piste, modélisée par la force $\vec{R}$.
b.



5. a. D'après la 2e loi de Newton :
$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{R} = m \cdot \vec{a}$
b. En prenant les coordonnées sur (Ox) :
$P \cdot \sin \alpha + 0 = m \cdot a_x$
En prenant les coordonnées sur (Oy) :
$-P \cdot \cos \alpha + R = m \cdot a_y = 0$, puisque, d'après **3. b**, $\vec{a}$ suit (Ox).
c. $P \cdot \sin \alpha + 0 = m \cdot a$, donc :
$m \cdot g \cdot \sin \alpha = m \cdot a$, soit :

$g \cdot \sin \alpha = a$, d'où $\sin \alpha = \frac{a}{g}$.

Donc :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{a}{g}\right) = \arcsin\left(\frac{1{,}0}{9{,}8}\right) = 5{,}9°.$$

36 **1.** D'après la 2e loi de Newton : $\sum \vec{F} = \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

2. a. $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_B - \vec{v}_A}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_B}{\Delta t}$
car $\vec{v}_A = \vec{0}$.

b. $a = \frac{14}{0{,}11} = 127 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 1{,}3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

c. D'après la question **1**, $F = m \cdot a$, donc :
$F = 160 \times 10^{-3} \times 127 = 20$ N

d. L'expression de la valeur du poids de la balle est $P = m \cdot g$ d'où :
$P = 160 \times 10^{-3} \times 9{,}8 = 1{,}6$ N
Donc $F/P = 13$: la valeur de la force F est 13 fois plus grande que le poids. Le poids peut donc bien être négligé par rapport à la force F.

37 **› Démarche experte**

L'énoncé indique que le poids et la portance se compensent, ce qui permet directement de simplifier la 2e loi de Newton et d'écrire $\vec{F} + \vec{f} = m \cdot \vec{a}$, $\vec{F}$ et $\vec{f}$ ayant même direction mais des sens opposés, et $\vec{F}$ étant la force de poussée qui est dans la même direction et le même sens que $\vec{a}$.

Alors, $F - f = m \cdot a$. Donc :

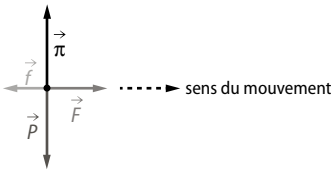
$$f = F - m \cdot a = F - m\frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$= 320 \times 10^3 - 75 \times 10^3 \times \frac{\left(\frac{300}{3{,}6}\right) - 0}{21}$$

$$= 22 \times 10^3 \text{ N} = 22 \text{ kN}$$

› Démarche avancée

1.



2. L'accélération moyenne correspond à :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{300}{3{,}6}\right) - 0}{21} = 4{,}0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

3. D'après la 2e loi de Newton :

$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{\pi} + \vec{F} + \vec{f} = m \cdot \vec{a}$

Comme le poids et la portance se compensent :

$\sum \vec{F} = \vec{F} + \vec{f} = m \cdot \vec{a}$

En projetant sur l'axe horizontal : $F - f = m \cdot a$

Donc $f = F - m \cdot a$

$= 320 \times 10^3 - 75 \times 10^3 \times 4{,}0$

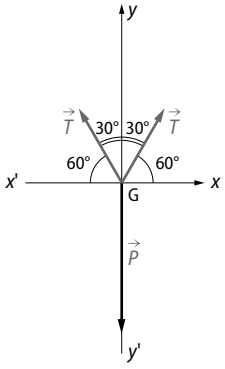
$= 20 \times 10^3 \text{ N} = 20 \text{ kN}$

38 *Cet exercice est en bleu sur le manuel élève et corrigé pour les élèves sur le site ressources.*

1. La barre LED étant homogène, le centre de masse est au centre géométrique de la barre, c'est-à-dire au centre du parallélépipède rectangle.

2. La barre est immobile : $\vec{v} = \vec{0}$ et $\sum \vec{F} = \vec{0}$, le système est à l'équilibre.

3. Si on représente toutes les forces en G, on a :



D'après la 2e loi de Newton :

$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{T} + \vec{T} = m \cdot \vec{a} = \vec{0}$.

En projetant sur l'axe vertical ($y'y$) :

$-P + 2T \cdot \sin 60° = 0$, d'où :

$2T \cdot \sin 60° = P$

Donc $T = \dfrac{P}{2 \sin 60°} = \dfrac{m \cdot g}{2 \sin 60°}$

Soit $T = \dfrac{500 \times 10^{-3} \times 9{,}8}{2 \times \sin 60°} = 2{,}8 \text{ N}$

39 **1.** On peut remplacer l'expression par la variation de vitesse $\Delta\vec{v}$.

2. La force motrice représente la résultante de forces ou somme des forces $\sum \vec{F}$.

3. Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces modélisant les actions mécaniques exercées sur le système est égale au produit de la masse du système par le vecteur accélération de son centre de masse : $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

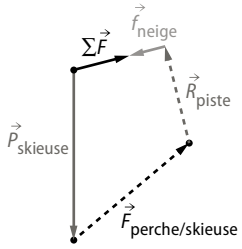
4. $\vec{a}$ est proportionnel à $\sum \vec{F}$ donc, si la résultante des forces double, l'accélération double, etc.

40 **1.** Le système est {skieuse}, étudié dans le référentiel terrestre galiléen.

2. Le point G représente le centre de masse du système.

3. En traçant la résultante des forces :

$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{F} + \vec{R} + \vec{f} = m \cdot \vec{a}$



Mais, n'ayant aucune échelle fournie, la seule information disponible est la valeur de g, donc du poids $P = m \cdot g$. Il faut donc comparer les longueurs des vecteurs $\vec{P}$ et $\sum \vec{F}$.

$$\frac{\sum F}{P} = \frac{m \cdot a}{m \cdot g} = \frac{a}{g} = \frac{\text{longueur du vecteur } \sum \vec{F}}{\text{longueur du vecteur } \vec{P}} = 0{,}32$$

donc $a = 0{,}32g = 0{,}32 \times 9{,}8 = 3{,}1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

41 *Cet exercice est en bleu sur le manuel élève et corrigé pour les élèves sur le site ressources.*

1. Le système est {voiture}, étudié dans le référentiel terrestre galiléen.

2. La voiture est repérée par l'avant car il est plus facile de voir ce point sur le schéma que le centre de masse.

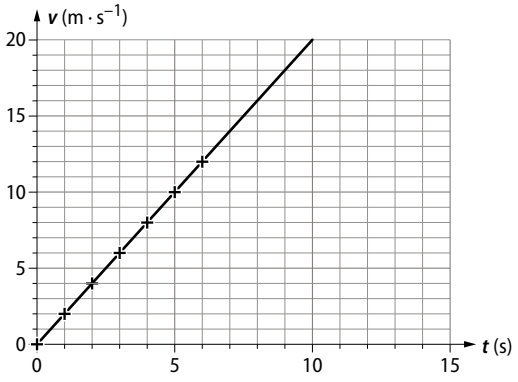
3. Pour évaluer la vitesse de la voiture à l'instant t_i, il faut repérer les positions x_i de chaque position avant des voitures, puis calculer la vitesse par la relation :

$$v_i = \frac{M_{i-1}M_{i+1}}{\Delta t} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\tau}$$

4. a.

t_i (en s)	x_i (en m)	v_i (en m · s^{-1})
0	0	0
1,0	1,0	2,0
2,0	4,0	4,0
3,0	9,0	6,0
4,0	16	8,0
5,0	25	10
6,0	36	12
7,0	49	

b.



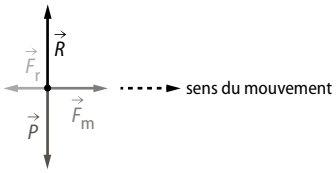
c. $v = f(t)$ est une droite passant par l'origine. v et t sont donc proportionnels, d'où $v = k \cdot t$, avec k le coefficient directeur de la droite.

$$k = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{12 - 0}{6{,}0 - 0} = 2{,}0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

d. Par définition, $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$, donc $a = 2{,}0$ m · s^{-2}.

e. Le système est soumis à quatre actions mécaniques modélisées par le poids $\vec{P}$, la réaction de la route $\vec{R}$, la force motrice $\overrightarrow{F_m}$ et la force de résistance $\vec{F_r}$

$$\sum \vec{F} = \vec{P} + \overrightarrow{F_m} + \vec{R} + \vec{F_r} = m \cdot \vec{a}$$



En projetant sur l'axe horizontal :
$F_m - F_r = m \cdot a$, donc $F_r = F_m - m \cdot a$.
Soit $F_r = 3\,000 - 1\,200 \times 2{,}0$
$= 600 \text{ N} = 6{,}0 \times 10^2 \text{ N}$

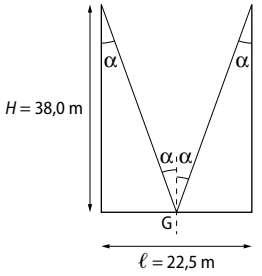
42 Exemple d'exposé oral

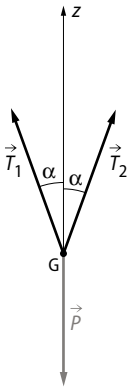
L'animation qui nous est présentée permet d'étudier deux **systèmes**, une plume et une pomme, en chute dans un tube vide. Ces deux systèmes sont étudiés dans le **référentiel terrestre galiléen**.
Au départ, les deux **centres de masse** sont à la même hauteur et on lâche les deux systèmes. De plus, comme l'expérience est faite dans le vide, il n'y a aucune action de l'air sur les systèmes. La seule action présente est celle de la Terre sur les systèmes, modélisée par le poids de chaque système.
Alors, d'après la **2e loi de Newton**, $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{P}$: le produit de la masse par l'**accélération** est égal au poids. Le poids ayant pour expression le produit de la masse par l'intensité de la pesanteur, alors $m \cdot a = m \cdot g$, donc $a = g$, c'est-à-dire que l'**accélération** est égale à l'**intensité de la pesanteur**. Les deux systèmes ont donc la même accélération, indépendante de leur masse : ils tombent donc de la même façon et touchent le sol en même temps.

43 Exemple d'exposé oral

La fiche technique du manège du « reverse bungee », que les élèves pourront rechercher, permet de déterminer les valeurs des forces qui modélisent les actions mécaniques des élastiques sur la nacelle. En effet, les dimensions de l'appareil permettent par des calculs simples de déterminer, avec les angles, la valeur de la somme de ces deux tensions.
Nous prendrons comme exemple la fiche suivante, qui pourra être donnée aux élèves.

Fiche technique
Hauteur des tours : 38,0 m
Hauteur de lancement : 55 m
Force maximale : 4,8 g
Largeur de la façade : 22,5 m
Capacités passagers : 2
Hauteur minimale d'un passager : 1,40 m
Masse totale combinée des passagers : 150 kg





• D'après la fiche technique, $\tan\alpha = \frac{\ell/2}{H} = \frac{11{,}25}{38{,}0}$.

Donc $\alpha = \arctan\left(\frac{11{,}25}{38{,}0}\right) = 16{,}5°$

Selon la deuxième loi de Newton, $\vec{P} + \vec{T_1} + \vec{T_2} = m \cdot \vec{a}$.
Les coordonnées sur l'axe vertical donnent :
$-P + T_1 \cdot \cos\alpha + T_2 \cdot \cos\alpha = m \cdot a$
Or, $T_1 = T_2 = T$, donc :
$2T \cdot \cos\alpha = m \cdot a + P = m \cdot a + m \cdot g$
Soit $T = \frac{m(a+g)}{2\cos\alpha}$
Ainsi, on peut déterminer la valeur de T selon les données de la fiche :
$T = \frac{150(4{,}8 \times 9{,}81 + 9{,}81)}{2\cos 16{,}5°} = 4{,}55 \times 10^3$ N

• Comme les élastiques sont étirés par un câble plus ou moins tendu selon que la nacelle arrive au contact du plot de départ, en supposant T = constante, on peut alors évaluer l'accélération suivant la masse des passagers :
$m \cdot a = 2T \cdot \cos\alpha - m \cdot g$
D'où $a = \frac{2T \cdot \cos\alpha}{m} - g$.

Développer ses compétences p. 287

44 › Questions préliminaires

1. L'équation de la figure A du document 2 indique $z(t) = 1{,}0 \times t^2$.
Or $a_z(t) = \frac{dv_z}{dt}$ et $v_z(t) = \frac{dz(t)}{dt}$, d'où $v_z(t) = 2{,}0 \times t$ et $a_z = 2{,}0$ m · s^{-2}, ce qui correspond à la figure B de ce document, qui montre que $a_z(t)$ est une constante égale à 2,0 m . s^{-2}.

2. Pour le système {drone} étudié dans le référentiel terrestre galiléen, et comme on suppose que seuls le poids $\vec{P}$ et la force de poussée verticale $\vec{F}$ s'exercent sur lui, la 2e loi de Newton donne $\sum\vec{F} = \vec{P} + \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.
Les coordonnées suivant l'axe vertical (Oz) orienté vers le haut donnent : $-P + F = m \cdot a_z$. Comme $a_z > 0$, alors $-P + F > 0$, soit $F > P$ pour pouvoir décoller

3. On a établi à la question précédente que :
$-P + F = m \cdot a_z$
$F = m \cdot a_z + P = m \cdot a_z + m \cdot g = m \cdot (a_z + g)$
$F = 110 \times 10^{-3} \times (2{,}0 + 9{,}8) = 1{,}3$ N

› Le problème à résoudre

Le décollage avec la webcam (de masse m_w) ne sera plus possible que si l'accélération n'est plus verticale vers le haut, c'est-à-dire si elle est négative, donc si $-P + F < 0$, soit $P > F$, c'est-à-dire si :
$(m + m_w) \cdot g > F$
$m \cdot g + m_w \cdot g > F$
$m_w \cdot g > F - m \cdot g$
$m_w > \frac{F}{g} - m$
$m_w > \frac{1{,}3}{9{,}8} - 110 \times 10^{-3}$
$m_w > 23 \times 10^{-3}$ kg
Donc, si la masse de la webcam est supérieure à 23 g, le décollage n'est plus possible.

45 › Questions préliminaires

1. Par définition, $\vec{a}_3 = \frac{\Delta\vec{v}_3}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_4 - \vec{v}_2}{2\tau}$, il faut donc procéder par étapes :

• Détermination des vecteurs vitesse :

$\vec{v}_2 = \frac{\overrightarrow{G_1G_3}}{\Delta t} = \frac{\overrightarrow{G_1G_3}}{2\tau}$ soit, en valeur, $v_2 = \frac{G_1G_3}{2\tau}$.
Avec le facteur d'échelle sur le document, on trouve $G_1G_3 = 13$ m.
$v_2 = \frac{13}{2 \times 0{,}800} = 8{,}1$ m · s^{-1}

$\vec{v}_4 = \frac{\overrightarrow{G_3G_5}}{\Delta t} = \frac{\overrightarrow{G_3G_5}}{2\tau}$ soit, en valeur, $v_4 = \frac{G_3G_5}{2\tau}$.
Avec le facteur d'échelle sur le document, on trouve $G_3G_5 = 26$ m soit :
$v_4 = \frac{26}{2 \times 0{,}800} = 16$ m · s^{-1}

On trace par exemple les vecteurs vitesse avec l'échelle 1,0 cm ↔ 2,0 m · s^{-1}, donc :
$\vec{v}_2$ est représenté par un vecteur de 4,0 cm ;
$\vec{v}_4$ est représenté par un vecteur de 8,0 cm ;
Les vecteurs vitesse sont tangents à la trajectoire et orientés dans le sens du mouvement.

• Construction du vecteur $\Delta\vec{v}_3 = \vec{v}_4 - \vec{v}_2$ en G_3 :
Il est dans la même direction que $\vec{v}_2$ et $\vec{v}_4$ et dans le sens du mouvement. $\Delta\vec{v}_3$ mesure 4,0 cm donc, avec l'échelle des vitesses, $\Delta v_3 = 8{,}0$ m · s^{-1}.

• Détermination de la valeur de a_3 :
$a_3 = \dfrac{\Delta v_3}{2\tau}$, donc $a_3 = \dfrac{8{,}0}{2 \times 0{,}800} = 5{,}0$ m · s^{-2}

2. D'après le document 3, $v = f(t)$ est une droite passant par l'origine. v et t sont donc proportionnels, d'où $v = k \cdot t$, avec k le coefficient directeur de la droite :
$k = a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t} = \dfrac{50 - 0}{10 - 0} = 5{,}0$ m · s^{-2}

Remarque : l'énoncé précise aussi que l'accélération est constante.

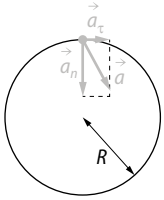
› Le problème à résoudre

Le motard arrive au point B avec une vitesse de 160 km · h^{-1}, soit 160/3,6 = 44,4 m · s^{-1}.
Par lecture graphique sur le document 3, il atteint donc ce point à la date $t = 9{,}0$ s.
Par nouvelle lecture graphique sur le document 4, il a alors parcouru une distance $d = 200$ m, donc AB = $2{,}0 \times 10^2$ m.
En supposant les frottements négligeables et en étudiant le système {motard + moto} dans le référentiel terrestre galiléen, la 2e loi de Newton donne :
$\sum\vec{F} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.
Les coordonnées suivant l'axe horizontal donnent :
$0 + 0 + F = m \cdot a$.
Donc, tout simplement, $F = m \cdot a$, soit :
$F = 180 \times 5{,}0 = 9{,}0 \times 10^2$ N.
La force motrice est de $9{,}0 \times 10^2$ N.

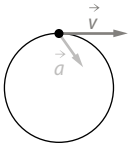
46 › Questions préliminaires

1. Pour un mouvement circulaire, on utilise la base de Frenet pour définir l'accélération $\vec{a} = \dfrac{dv}{dt}\vec{\tau} + \dfrac{v^2}{R}\vec{n}$.
Ainsi, que la vitesse soit constante ou non, il existe toujours un terme non nul et le vecteur accélération n'est jamais nul pour un mouvement circulaire.

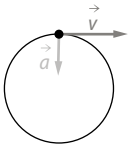
2. Dans tous les cas, le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire.



Si le mouvement est accéléré, v augmente et $\dfrac{dv}{dt} > 0$, ainsi la coordonnée a_τ du vecteur accélération suivant le vecteur unitaire $\vec{\tau}$ est positive et la coordonnée a_n est orientée vers le centre de la trajectoire, donc $\vec{a}$ est orienté dans le sens de rotation.
Donc pour un mouvement circulaire accéléré, on obtient le schéma ci-dessous.



Pour que le mouvement soit circulaire uniforme, il faut que la vitesse soit constante donc :
$a_\tau = \dfrac{dv}{dt} = 0$.
Le vecteur accélération ne comprend donc que la coordonnée a_n. Le vecteur accélération est donc dans la direction du vecteur $\vec{n}$, orienté vers le centre du cercle. Le vecteur accélération est radial et centripète.
Donc, pour un mouvement circulaire uniforme, on obtient le schéma suivant :



› Problématique

On étudie le système {boulet} dans le référentiel terrestre galiléen. Les actions mécaniques qui s'exercent sur le boulet sont :
– l'action de la Terre sur le boulet, modélisée par le poids $\vec{P}$ du boulet ;
– l'action du câble sur le boulet, modélisée par la force $\vec{F}$;
La 2e loi de Newton donne $\sum\vec{F} = \vec{P} + \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.
On demande de montrer que le poids du boulet est négligeable devant la force F pour un mouvement circulaire uniforme. Dans ce cas $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, donc $\vec{F} = m\dfrac{v^2}{R}\vec{n}$.

La valeur de la force est alors égale à $F = m\dfrac{v^2}{R}$ et comme le poids est égal à $P = m \cdot g$, le rapport vaut :

$$\frac{F}{P} = \frac{m\dfrac{v^2}{R}}{m \cdot g} = \frac{v^2}{R \cdot g}$$

Le boulet tourne autour de l'athlète sur un rayon égal à la longueur de son bras plus celle du câble, soit environ 2 m (on peut voir à la télévision que, tenu à bout de bras, le boulet touche le sol avec ces grands athlètes).

Donc $\dfrac{F}{P} = \dfrac{26^2}{2{,}0 \times 9{,}8} = 34$, donc F est 34 fois plus grand que P : le poids est bien négligeable devant la force exercée par le câble.

47 **1. a.** Le référentiel du laboratoire correspond au référentiel terrestre galiléen, puisque le mouvement étudié ne dure que quelques secondes.

b. Les forces modélisant les actions exercées sur la bille sont :

• le poids $\vec{P}$ (direction : verticale, sens : vers le bas ; $P = m \cdot g$) ;

• la poussée d'Archimède $\vec{F}_A$ (direction : verticale, sens : vers le haut ; $F_A = \rho_{huile} \cdot V \cdot g$) ;

• la force de frottement $\vec{f}$ (direction : verticale, sens : vers le haut ; $f = k \cdot v_G$).

c. La 2e loi de Newton donne :

$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{f} = m \cdot \vec{a}$

Soit $m \cdot \vec{g} - \rho_{huile} \cdot V \cdot \vec{g} - k \cdot \vec{v}_G = m\dfrac{d\vec{v}_G}{dt}$. Or les vecteurs $\vec{v}_G$ et $\vec{g}$ sont tous les deux orientés sur l'axe vertical vers le bas. Donc les coordonnées sur cet axe donnent :

$m\dfrac{dv_G}{dt} = m \cdot g - \rho_{huile} \cdot V \cdot g - k \cdot v_G$, ce qui correspond bien à une équation différentielle en v_G.

d. En divisant par m on obtient :

$$\begin{aligned}\frac{dv_G}{dt} &= \frac{m \cdot g - \rho_{huile} \cdot V \cdot g}{m} - \frac{k}{m}v_G \\ &= \frac{g \cdot (m - \rho_{huile} \cdot V)}{m} - \frac{k}{m}v_G \\ &= g \cdot \left(1 - \frac{\rho_{huile} \cdot V}{m}\right) - \frac{k}{m}v_G \\ &= A - B \cdot v_G\end{aligned}$$

avec les notations données par l'énoncé.

e. $A = g \cdot \left(1 - \dfrac{\rho_{huile} \cdot V}{m}\right)$

$= 9{,}81 \times \left(1 - \dfrac{0{,}910 \times 33{,}5 \times 10^{-3}}{35{,}0 \times 10^{-3}}\right) = 1{,}27$ S.I

Or A est homogène à $\dfrac{dv_G}{dt}$, soit une accélération, donc A est en $m \cdot s^{-2}$.

f. *Remarque :* nous nous appuyons sur les capacités attendues de la spécialité mathématiques et de l'option mathématiques complémentaires de Terminale en ce qui concerne l'équation différentielle $y' = ay + b$ ($a \neq 0$).

$\dfrac{dv_G}{dt} = -B \cdot v_G + A$ est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant non nul, du type $y' = ay + b$.

Cette équation admet une solution du type :

$y(t) = y_p + y_h$ où :

• y_p est la solution de l'équation particulière ($y_p' = 0$), soit $ay_p + b = 0$, donc $y_p = -\dfrac{b}{a}$.

• y_h est la solution de l'équation homogène sans second membre $y_h' + ay_p = 0$, donc $y_h(t) = k \cdot e^{a \cdot t}$.

Ainsi, $y(t) = -\dfrac{b}{a} + k \cdot e^{a \cdot t}$.

Par identification terme à terme avec :

$\dfrac{dv_G}{dt} = -B \cdot v_G + A$;

y correspond à v_G, a correspond à $-B$ et enfin b correspond à A, d'où $v_G(t) = \dfrac{A}{B} + k \cdot e^{-B \cdot t}$.

Enfin, pour connaître la constante k, à $t = 0$ s :

$v_G(0) = 0 = \dfrac{A}{B} + k \cdot e^{-B \times 0} = \dfrac{A}{B} + k$, donc $k = -\dfrac{A}{B}$.

Donc $v_G(t) = \dfrac{A}{B} - \dfrac{A}{B} \cdot e^{-B \cdot t} = \dfrac{A}{B}(1 - e^{-B \cdot t})$.

g. La solution est en accord avec le graphe puisque, à $t = 0$ s, $v_G(0) = 0$ et, quand t tend vers l'infini, $e^{-B \cdot t}$ tend vers 0, donc $v_G(t)$ tend vers A/B, qui est constant et qui correspond à l'asymptote de la courbe.

2. a. $\vec{f} = -k \cdot \vec{v}_G$ et $\vec{f} = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot \vec{v}_G$, d'où :

$k = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R$

Or, $B = \dfrac{k}{m}$, donc $B = \dfrac{6\pi \cdot \eta \cdot R}{m}$, soit :

$\eta = \dfrac{B \cdot m}{6\pi \cdot R}$

b. $\eta = \dfrac{7{,}5 \times 35{,}0 \times 10^{-3}}{6\pi \times 2{,}00 \times 10^{-2}} = 0{,}696 = 0{,}70$ Pa · s

c. L'huile moteur est la SAE 50.

Remarque : A/B = 1,27/7,5 = 0,17 m · s^{-1} = 17 cm · s^{-1}, qui correspond bien à la vitesse limite atteinte par la balle (asymptote de la courbe).

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 290

Remarque : il faut utiliser des élastiques pour la pêche qui cassent pour des masses d'environ 1 à 2 kg et lester le mobile.

1. Proposition de protocole expérimental

• Attacher un mobile autoporteur avec un élastique lui-même fixé à un point fixe de la table.

• Lancer le mobile autoporteur afin que l'élastique se tende jusqu'au point de rupture et réaliser la chronophotographie tout au long du mouvement.

• Déterminer les vecteurs vitesse avant et après le point de rupture, en déduire le vecteur variation de vitesse et accélération au point de rupture.

• Utiliser la 2e loi de Newton pour déterminer la valeur de la force élastique au moment du point de rupture.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. Le point de rupture est le point M_i où le mouvement passe de rectiligne ralenti à rectiligne uniforme.

2. $v_{i-1} = \dfrac{G_{i-2}G_i}{2\tau}$ et $v_{i+1} = \dfrac{G_iG_{i+2}}{2\tau}$.

On trace $\vec{v}_{i-1}$ et $\vec{v}_{i+1}$ avec une échelle judicieusement choisie.

3. On trace $\overrightarrow{\Delta v_i}$ et on détermine sa valeur Δv_i grâce à l'échelle.

On calcule $a_i = \dfrac{\Delta v_i}{2\tau}$.

4. La 2e loi de Newton donne :

$\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

Les coordonnées suivant l'axe horizontal donnent :

$0 + 0 + F = m \cdot a$

Donc, tout simplement, $F = m \cdot a$.

Remarque : $\vec{F}$ et $\vec{a}$ sont opposées au mouvement.

CHAPITRE 12

Manuel p. 292

Mouvement dans un champ uniforme

LE PROGRAMME

2. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Mouvement dans un champ uniforme Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme. Champ électrique créé par un condensateur plan. Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme. Principe de l'accélérateur linéaire de particules chargées. Aspects énergétiques.	Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan. Établir et exploiter les équations horaires du mouvement. Établir l'équation de la trajectoire. Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan, son expression étant donnée. Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées. Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme. *Utiliser des capteurs ou une vidéo pour déterminer les équations horaires du mouvement du centre de masse d'un système dans un champ uniforme. Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique.* **Capacité numérique :** Représenter, à partir de données expérimentales variées, l'évolution des grandeurs énergétiques d'un système en mouvement dans un champ uniforme à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur. **Capacités mathématiques :** Résoudre une équation différentielle, déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 292

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves savent appliquer la conservation de l'énergie mécanique, ou bien le théorème de l'énergie cinétique, dans le cas d'une chute libre. Ces relations sont étudiées en enseignement de spécialité de 1re.

› Exemple de réponse attendue

1. On suppose l'absence de force non conservative. D'après la conservation de l'énergie mécanique $E_m = E_c + E_p$ = constante. Le niveau de référence de l'énergie potentielle de pesanteur choisi est le sol. Soient A le point de départ de la chute verticale et B le point d'impact.

$E_{m_A} = E_{m_B}$, soit $E_{p_A} = E_{c_B}$ car $v_A = 0$ m · s^{-1} et $z_B = 0$ m.

Ainsi : $m \cdot g \cdot z_A = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2$, soit :

$z_A = \frac{v_B^2}{2g}$ et $z_A = \frac{\left(\frac{50}{3,6}\right)^2}{2 \times 9,8} = 9,8$ m.

Cela correspond à une chute de 3,3 étages de 3,0 m.

2. D'après le théorème de l'énergie cinétique appliqué entre A et B : $\Delta E_c = E_{c_B} - E_{c_A} = W_{AB}(\vec{P})$

car seule la force de pesanteur s'exerce. D'où :

$\Delta E_c = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - 0 = m \cdot g(z_A - z_B)$.

On retrouve $z_A = \frac{v_B^2}{2g}$.

› En classe de Terminale

Les élèves auront à exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas de mouvements de particules chargées dans un champ électrique uniforme (**activité 1**).

SITUATION 2

Dans cette deuxième situation, les élèves sont invités à réinvestir les notions de force de pesanteur et de force électrique définies à partir des vecteurs champ. Ils doivent identifier les forces et calculer un rapport pour les comparer.

› Exemple de réponse attendue

1. La force électrique qui s'exerce sur le noyau d'hélium a pour valeur $F_e = q \cdot E = 2e \cdot E$, soit :
$F_e = 2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 100 = 3{,}2 \times 10^{-17}$ N.

La force de pesanteur a pour valeur $P = m \cdot g$ soit :
$P = 6{,}6 \times 10^{-27} \times 9{,}8 = 6{,}5 \times 10^{-26}$ N.

$\frac{F_e}{P} = 4{,}9 \times 10^{8}$. L'action mécanique modélisée par la force de pesanteur est négligeable devant celle modélisée par la force électrique.

2. Dans le cas d'un atome, la charge est nulle, donc $F_e = 0$ N. L'action mécanique modélisée par la force de pesanteur prédomine.
Remarque : l'ion hélium He^{2+} correspond au noyau d'hélium.

› En classe de Terminale

Les élèves exploiteront l'expression du champ électrique créé par un condensateur plan (**activité 3**). La force électrique sera nécessaire pour décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées (**activité 1**).

ACTIVITÉS

p. 294 **ACTIVITÉ 1**

Un accélérateur linéaire

Commentaires pédagogiques

Cette activité documentaire permet aux élèves de découvrir un premier type d'accélérateur de particule. Elle leur permet de réinvestir la notion de champ et d'énergie potentielle ainsi que d'appliquer le principe de conservation de l'énergie.

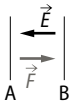
› Exploitation et analyse

1. Le champ électrique agit sur les ions produits par l'accélérateur. Il prédomine devant le champ de pesanteur, négligé en présence de particules chargées.

2. a. Des ions négatifs issus de l'atome d'hydrogène (anions H^-) sont accélérés entre les armatures A et B. L'anion est accéléré, donc l'armature B est chargée positivement.

b. $V_B > V_A$ donc $U_{AB} = V_A - V_B < 0$.

c.



3. a. $V_B = V_A - U_{AB} = 2{,}0 \times 10^6$ V puis :
$E_{p(élec)}(B) = -e \cdot V_B$ soit :
$E_{p(élec)}(B) = -1{,}6 \times 10^{-19} \times 2{,}0 \times 10^6$
$= -3{,}2 \times 10^{-13}$ J

b. $E_m(A) = E_m(B)$, avec ici $E_m(A) = 0$.

D'où $0 = E_c(B) + E_{p(élec)}(B)$ soit $\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = -E_{p(élec)}(B)$ soit :

$$v_B = \sqrt{\frac{-2E_{p(élec)}(B)}{m}} = \sqrt{\frac{-2 \times (-3{,}2 \times 10^{-13})}{1{,}67 \times 10^{-27}}}$$
$$= 2{,}0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. a. L'éplucheur « enlève » deux électrons à l'ion H^-.

b. L'ion H^+ désormais produit doit être accéléré à nouveau vers l'armature D de charge négative. C est chargée positivement.

c. $E_m(C) = E_m(D)$, donc :
$E_c(D) + E_{p(élec)}(D) = E_c(C) + E_{p(élec)}(C)$
Soit :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_D^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_C^2 + q(V_C - V_D)$$
$$= \frac{1}{2} m \cdot v_C^2 + e \cdot U_{CD}$$

$$v_D = \sqrt{v_C^2 + \frac{2q \cdot U_{CD}}{m}}$$

$$v_D = \sqrt{(2{,}0 \times 10^7)^2 + \frac{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 2{,}0 \times 10^3}{1{,}67 \times 10^{-27}}}$$
$$= 2{,}8 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

› Synthèse

5. a. Chaque condensateur plan permet aux particules de se déplacer dans un champ électrique uniforme en les accélérant. Au cours du mouvement dans le champ uniforme, il y a transfert d'énergie : l'énergie potentielle électrique est convertie en énergie cinétique.

b. Le mouvement des ions est rectiligne accéléré, d'où les termes d'accélérateur linéaire.

p. 295 **ACTIVITÉ 2**

Mouvement d'un projectile

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité a pour objectif de faire travailler expérimentalement les élèves sur les équations différentielles. Il s'agit aussi pour eux de mettre en

place la notion d'équations horaires du mouvement et de les exploiter.
Lors de cette activité expérimentale, les élèves ont à réaliser une vidéo d'un objet en mouvement dans un champ de pesanteur uniforme. Ils doivent comparer deux méthodes de détermination de l'intensité de la pesanteur et mener des calculs d'incertitude.

› Exploitation et analyse

1. a. On réalise le protocole expérimental proposé pour représenter les deux courbes. $x(t)$ a l'allure d'une droite et $y(t)$ a une allure parabolique.
b. $v_x(t)$ semble constant ou varie peu : le mouvement horizontal de la balle est uniforme.
$v_y(t)$ a l'allure d'une fonction affine décroissante ; le mouvement vertical de la balle lancée à l'instant $t = 0$ s vers le haut est ralenti.

2. a. $a_x(t)$ est voisin de 0. $a_y(t)$ est voisin de $-10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.
b. g_{mes} est la valeur moyenne de a_x obtenue à l'aide du tableur. Un exemple de résultat obtenu est $g_{mes} = 10{,}6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$. L'incertitude-type associée est calculée à l'aide de l'écart-type et du nombre de points mesurés. Sur notre exemple, $u(g_{mes}) = 0{,}3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.
c. On en déduit que :
$$\frac{|g_{mes} - g_0|}{u(g_{mes})} = \frac{|10{,}6 - 9{,}81|}{0{,}3} = 2{,}6.$$
Cette première méthode est peu précise.

3. a. Dans le repère orthonormé (O ; x, y), puisque $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, on a :
$$\frac{d\vec{v}}{dt} \begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = a_x = 0 \\ \frac{dv_y}{dt} = a_y = -g_0 \end{cases}$$
Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possible de la forme :
$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + k_2 \end{cases}$$
où k_1 et k_2 sont des constantes.
La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux : $\overrightarrow{v(0)} = \overrightarrow{v_0}$, d'où :
$$\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(0) = -g_0 \times 0 + k_2 = v_0 \cdot \sin\alpha \end{cases}$$
$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin\alpha \end{cases}$$

b. De même, comme $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$, après intégration et en connaissant la position initiale O à $t = 0$ s, les équations horaires de la position s'écrivent :
$$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t \\ y(t) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t \end{cases}$$

c. On modélise la courbe expérimentale $y(t)$ par une parabole. La fonction $y(t)$ est ainsi modélisée par une fonction polynomiale de degré 2 en t. Sur notre exemple, le coefficient du terme de degré 2 vaut $-4{,}9\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, ce qui donne $g_{mes} = 9{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, soit une valeur très proche de la valeur réelle.

› Synthèse

4. a. La deuxième méthode est bien plus précise que la première.
b. Pour diminuer l'incertitude-type de la première méthode, il conviendrait d'utiliser une vidéo avec un plus grand nombre d'images par seconde. Cela permettrait de diminuer les incertitudes liées à la double dérivation.

p. 296

ACTIVITÉ 3

Électron et charge élémentaire

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet de d'exploiter les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur et d'établir l'équation de la trajectoire d'une particule chargée à l'intérieur de ce champ uniforme.

› Démarche experte

Voir Démarche avancée.

› Démarche avancée

1. On néglige l'action de la Terre devant celle modélisée par la force électrique.
D'après la deuxième loi de Newton :
$m \cdot \vec{a} = \vec{F_e} = -e \cdot \vec{E}$, d'où $\vec{a} = \frac{-e}{m} \cdot \vec{E}$.
Par projection, on obtient :
$a_x(t) = 0$ et $a_y(t) = \frac{e \cdot E}{m}$.
Après deux intégrations, on obtient :
$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \\ v_y(t) = \frac{e \cdot E}{m} t \end{cases} \quad \text{car, à } t = 0 \text{ s, } \overrightarrow{v(0)} = v_0 \vec{i}\ .$$
Puis :
$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t \\ y(t) = \frac{1}{2} \times \frac{e \cdot E}{m} \cdot t^2 \end{cases} \quad \text{car, à } t = 0 \text{ s, le système est en O.}$$
Par élimination, on obtient :
$$y(x) = \frac{e \cdot E}{2m \cdot v_0^2} x^2$$

2. a. Après modélisation, on trouve $y = 2{,}25x^2$.

b. $\frac{e}{m} = \frac{2\,v_0^2}{E} \times 2{,}25$ d'où, comme $E = \frac{U_{AB}}{d}$:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \times \left(4{,}2 \times 10^7\right)^2}{\frac{3{,}0 \times 10^3}{6{,}0 \times 10^{-2}}} \times 2{,}25 = 1{,}6 \times 10^{11}\ \text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

C'est une valeur proche de la valeur théorique ($1{,}758 \times 10^{11}\ \text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$).

› Démarche élémentaire

1. a. Le champ $\vec{E}$ est orienté vers l'armature chargée négativement, donc l'armature A est l'armature positive. La force électrique $\vec{F_e} = -e \cdot \vec{E}$ qui modélise l'action mécanique subie par l'électron est perpendiculaire aux armatures et orientée vers l'armature positive. On peut donc reprendre le schéma du document 2 et ajouter la force $\vec{F_e}$, de même direction et de sens opposé à $\vec{E}$.

b. On néglige l'action de la Terre devant celle modélisée par la force électrique.

D'après la deuxième loi de Newton,

$m \cdot \vec{a} = \vec{F_e} = -e \cdot \vec{E}$, d'où $\vec{a} = \frac{-e}{m} \cdot \vec{E}$.

Par projection, on obtient $a_x(t) = 0$ et $a_y(t) = \frac{e \cdot E}{m}$.

2. a. Puisque $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ on obtient après intégration pour équations horaires :

$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \\ v_y(t) = \frac{e \cdot E}{m} t \end{cases} \quad \text{car, à } t = 0 \text{ s, } \overrightarrow{v(0)} = v_0 \vec{i}\,.$$

b. De même, on obtient les coordonnées $x(t)$ et $y(t)$ après une deuxième intégration :

$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t \\ y(t) = \frac{1}{2} \times \frac{e \cdot E}{m} t^2 \end{cases} \quad \text{car, à } t = 0 \text{ s, le système est en O de coordonnées (0 ; 0).}$$

c. Par substitution de la variable $t = \frac{x}{v_0}$ dans l'expression de $y(t)$, on obtient l'équation de la trajectoire de la particule : $y(x) = \frac{e \cdot E}{2m \cdot {v_0}^2} x^2$.

3. a. Après modélisation, on trouve $y = 2{,}25x^2$.

b. $\frac{e}{m} = \frac{2v_0^2}{E} \times 2{,}25$ d'où :

$\frac{e}{m} = 1{,}6 \times 10^{11}\ \text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Chute d'une bille dans un liquide

Commentaires pédagogiques

Cette activité a pour objectif de suivre l'évolution des grandeurs énergétiques au cours de la chute d'une bille. Il s'agit de représenter ces évolutions à l'aide du langage de programmation Python.

› Exploitation et analyse

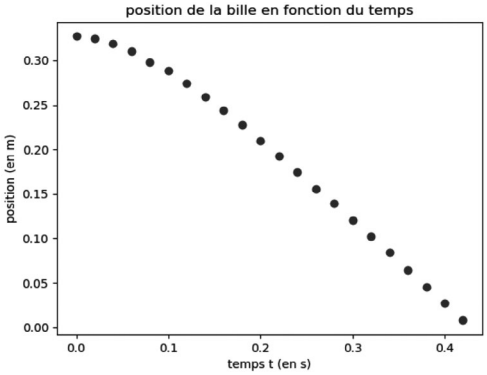
1. b. Après pointage des coordonnées du centre de masse de la bille au cours du mouvement, on modifie le programme Python de la façon suivante.

• On complète les listes `y` et `t` avec les valeurs relevées à l'aide du pointeur.

• On ajoute la portion de script suivante juste après les listes dans le programme. Cela permet de représenter graphiquement la position de la bille au cours du mouvement.

```
plt.plot(t,y,'ob')
plt.xlabel(«temps t (en s)»)
plt.ylabel(«position (en m)»)
plt.title(«position de la bille en fonction du temps»)
plt.show()
```

On obtient :



On passe en mode commentaire la suite du programme (utile pour la question **2)**.

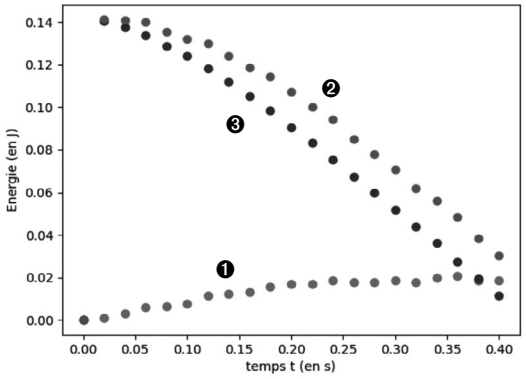
c. La courbe obtenue semble être composée d'une première partie parabolique et d'une deuxième partie affine.

2. a. On complète la boucle « for » à l'aide des définitions de la vitesse, puis des énergies cinétique, potentielle de pesanteur et mécanique. Dans l'exemple choisi, $m = 44$ g.

De plus, on modifie le numéro d'arrêt de la boucle selon le nombre de points expérimentaux traités :

```
for i in range(1,21):
    Vi=(y[i+1]-y[i-1])/(t[i+1]-t[i-1])
    Eci=0.5*Vi**2*0.044
    Epi=0.044*9.81*y[i]
    Emi=Eci+Epi
```

b.



La courbe 1 représente l'énergie cinétique dont la valeur augmente au cours du temps.
La courbe 2 représente l'énergie mécanique car il s'agit de la somme des énergies cinétique et potentielle.
La courbe 3 représente l'énergie potentielle de pesanteur.

3. a. Au cours du mouvement, la bille subit l'action de la Terre, modélisée par la force de pesanteur, et l'action du liquide, modélisée par des forces de frottement.
b. $\Delta E_m = W_{AB}(\vec{f})$.
Sur l'exemple choisi, $\Delta E_m = -0{,}11$ J.

› Synthèse

4. a. Au cours du mouvement, l'énergie potentielle de pesanteur est convertie partiellement en énergie cinétique et l'énergie mécanique diminue à cause du travail des forces de frottement.

b. Pour une force constante, $f = \dfrac{-W_{AB}(\vec{f})}{AB}$.
Au cours du mouvement dans notre exemple, AB = 0,319 m, d'où f = 0,34 N. D'après le document 1, la force de frottement varie avec la vitesse, donc la force de frottement n'est pas constante au cours du mouvement. Calculer une force de frottement moyenne n'est finalement pas pertinent.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel

p. 302

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le mouvement est uniformément accéléré.
La proposition B est une bonne réponse car le mouvement est contenu dans le plan formé par les vecteurs vitesse initiale et champ de pesanteur $\vec{a} = \vec{g}$.
La proposition C est une bonne réponse car $\vec{a} = \vec{g}$.

2 La proposition A est une mauvaise réponse car $\vec{g}_0$ est orienté dans le sens opposé de l'axe (Oy) ascendant.
La proposition B est une mauvaise réponse car les composantes v_x et v_y sont échangées.
La proposition C est une bonne réponse.

3 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la trajectoire est parabolique.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'équation d'une trajectoire s'écrit $y = f(x)$ et non $y = f(t)$.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car $V_A > V_B$, donc l'armature négative est B et le champ électrique devrait être orienté vers B.
La proposition B est une bonne réponse car, dans un condensateur plan, le champ E est proportionnel à la tension U_{AB}.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la valeur du champ est inversement proportionnelle à d.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la particule est déviée vers l'armature négative, elle est chargée positivement.
La proposition B est une bonne réponse. On le justifie en établissant les équations horaires de la vitesse (voir cours p. 299).
La proposition C est une bonne réponse. On le justifie en établissant les équations horaires de la vitesse (voir cours p. 299).

6 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car $\vec{a} = \dfrac{e}{m} \cdot \vec{E}$.

7 La proposition A est une bonne réponse car en l'absence de forces non conservatives, l'énergie mécanique se conserve. Or, la force électrique est constante dans un champ uniforme donc elle est conservative.
La proposition B est une bonne réponse car la force électrique est conservative : on peut donc lui associer une énergie potentielle dite énergie potentielle électrique.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car si $E_m = c^{ste}$, alors $\Delta E_m = 0$ d'où $\Delta E_c = -\Delta E_p$.

8 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le vecteur accélération est perpendiculaire aux armatures pour que le travail moteur de la force électrique soit maximal.
La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases p. 303

› 1. Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme

9 **1.** D'après la deuxième loi de Newton :
$m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}_0$, d'où $\vec{a} = \vec{g}_0$.

2. Dans le repère (O ; z), puisque $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$, on a $\dfrac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} = g_0$.

Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :
$v_z(t) = g_0 \cdot t + k_1$, où k_1 est une constante à déterminer.
La connaissance de la vitesse initiale permet de trouver k_1 par identification :
$v_z(0) = g_0 \times 0 + k_1 = 0$ (vitesse initiale nulle), d'où $v_z(t) = g_0 \cdot t$.

De même, comme $\vec{v} = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{\mathrm{OG}}}{\mathrm{d}t}$, après intégration et en connaissant la position initiale O à $t = 0$ s, on a :
$z(t) = \dfrac{1}{2} g_0 \cdot t^2$

3. La trajectoire est rectiligne portée par l'axe (Oz), donc le mouvement de la bille est plan.

4. À l'instant t_C de l'impact, $z(t_C) = h$, d'où :
$z(t_C) = \dfrac{1}{2} g_0 \cdot t_C^2 = h$, soit $t_C = \sqrt{\dfrac{2h}{g_0}}$.
et $t_C = \sqrt{\dfrac{2 \times 1{,}00}{9{,}81}} = 0{,}452$ s.

5. La vitesse maximale est atteinte à l'instant t_C.
$v_z(t_C) = g_0 \cdot t_C$ et $v_z(t_C) = 9{,}81 \times 0{,}452 = 4{,}43$ m · s^{-1}.

10 **1.** On néglige l'action de l'air sur la balle. D'après la deuxième loi de Newton :
$m \cdot \vec{a} = m \cdot \overrightarrow{g_0}$, d'où $\vec{a} = \overrightarrow{g_0}$. Dans le repère orthonormé (O ; x, y, z), puisque $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$, on a :

$$\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} \begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = a_x = 0 \\ \dfrac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = a_y = -g_0 \\ \dfrac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} = a_z = 0 \end{cases}$$

Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles : $\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + k_2 \\ v_z(t) = k_3 \end{cases}$ où k_1, k_2 et k_3 sont des constantes.

La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux :
$\overrightarrow{v(0)} = \overrightarrow{v_0}$, d'où :

$$\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \cdot \cos\theta \\ v_y(0) = -g_0 \times 0 + k_2 = v_0 \cdot \sin\theta \\ v_z(0) = k_3 = 0 \end{cases}$$

$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \cdot \cos\theta \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin\theta \\ v_z(t) = 0 \end{cases}$$

De même, puisque $\vec{v} = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{\mathrm{OG}}}{\mathrm{d}t}$, après intégration et en connaissant la position initiale O à $t = 0$ s, les équations horaires de la position s'écrivent :

$$\overrightarrow{\mathrm{OG}(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \cdot \cos\theta \cdot t \\ y(t) = -\dfrac{1}{2} g_0 \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin\theta \cdot t \\ z(t) = 0 \end{cases}$$

2. $z(t) = 0$, donc le mouvement s'effectue dans le plan (xOy).

3. La portée est obtenue à l'instant t_p tel que $y(t_p) = 0$ m, soit pour :
$y(t_p) = -\dfrac{1}{2} g_0 \cdot t_p^2 + v_0 \cdot \sin\theta \cdot t_p = 0$

D'où $t_p = \dfrac{2 v_0 \cdot \sin\theta}{g_0}$ et la portée vaut :

$$x_{max} = x(t_p) = v_0 \cdot \cos\theta \cdot t_p = \frac{2 v_0^2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{g_0}$$

4. $x_{max} = \dfrac{2 \times 75{,}0^2 \times \sin 11° \times \cos 11°}{9{,}81} = 215$ m, ce qui est bien inférieur à la valeur limite annoncée.

11 **1**. On néglige l'action de l'air sur le système. D'après la deuxième loi de Newton, $m \cdot \vec{a} = m \cdot \overrightarrow{g_0}$, d'où $\vec{a} = \overrightarrow{g_0}$. Dans le repère orthonormé (O ; x, y, z), puisque $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$, on a :

$$\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} \begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = a_x = 0 \\ \dfrac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = a_y = 0 \\ \dfrac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} = a_z = -g_0 \end{cases}$$

2. Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :

$$\overrightarrow{v(t)}\begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = k_2 \\ v_z(t) = -g_0 \cdot t + k_3 \end{cases}$$

où k_1, k_2 et k_3 sont des constantes.

La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux : $\overrightarrow{v(0)} = \overrightarrow{v_0}$, d'où :

$$\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \\ v_y(0) = k_2 = 0 \\ v_z(0) = -g_0 \times 0 + k_3 = 0 \end{cases} \quad \text{soit } \overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \\ v_y(t) = 0 \\ v_z(t) = -g_0 \cdot t \end{cases}$$

De même, puisque $\vec{v} = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{OG}}{\mathrm{d}t}$, après intégration, les équations horaires de la position s'écrivent :

$$\overrightarrow{OG(t)}\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t + k_4 \\ y(t) = k_5 \\ z(t) = -\dfrac{g_0}{2} \cdot t^2 + k_6 \end{cases}$$ et, en connaissant la position initiale d'altitude $z(0) = H$, il vient :

$$x(t) = v_0 \cdot t \ ; y(t) = 0 \ ; z(t) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot t^2 + H.$$

3. $y(t) = 0$, donc le mouvement s'effectue dans le plan (xOz).

4. La phase descendante s'interrompt à l'instant t_d pour lequel $z(t_d) = h$.

Soit $-\dfrac{1}{2} g_0 \cdot t_d^2 + H = h$.

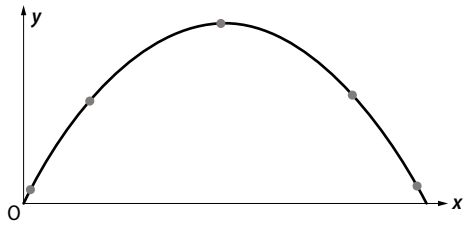
D'où $t_d = \sqrt{\dfrac{2(H - h)}{g_0}}$.

$$t_d = \sqrt{\frac{2 \times (4{,}5 - 0{,}70)}{9{,}81}} = 0{,}88 \text{ s}$$

12 **1.** $x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t$, d'où $t = \dfrac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}$ et, en reportant t dans $y(t)$, on obtient :

$$y(x) = \frac{-g_0}{2\, v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} x^2 + x \cdot \tan\alpha$$

2.



3. La flèche est atteinte à l'instant t_s tel que $v_y(t_s) = 0$, soit :

$v_y(t_s) = -g_0 \cdot t_s + v_0 \cdot \sin\alpha = 0$, soit $t_s = \dfrac{v_0 \cdot \sin\alpha}{g_0}$.

D'où :

$$y_{max} = y(t_s) = -\frac{g_0}{2} \cdot t_s^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t_s$$
$$= -\frac{g_0}{2}\left(\frac{v_0 \cdot \sin\alpha}{g_0}\right)^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \frac{v_0 \cdot \sin\alpha}{g_0}$$
$$= \frac{v_0^2 \cdot \sin^2\alpha}{2g_0}$$

Soit $y_{max} = \dfrac{10{,}0^2 \times \sin^2(60°)}{2 \times 9{,}81} = 3{,}8$ m.

4. La portée est obtenue à l'instant t_p tel que $y(t_p) = 0$ m soit pour :

$y(t_p) = -\dfrac{1}{2} g_0 \cdot t_p^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t_p = 0$, d'où :

$$t_p = \frac{2v_0 \cdot \sin\alpha}{g_0}$$

La portée vaut :

$$x_{max} = x(t_p) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t_p = \frac{2v_0^2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha}{g_0}$$

Soit :

$$x_{max} = \frac{2 \times 10{,}0^2 \times \sin 60° \times \cos 60°}{9{,}81} = 8{,}8 \text{ m}.$$

› 2. Mouvement dans un champ électrique uniforme

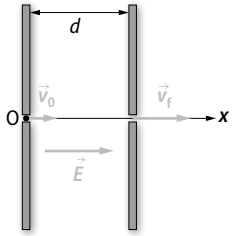
13 **1.** Réponse **b** car seule l'orientation du champ (et non la direction) varie en fonction du signe de la tension.

2. Réponse **c** car $E = \dfrac{U_{AB}}{d}$.

3. Réponse **c** car $E = \dfrac{U_{AB}}{d}$.

4. Réponses **b** et **c**.

14 **1.**



D'après le schéma de l'énoncé, $v_f > v_0$, donc l'armature de droite est chargée négativement pour accélérer le proton. Ainsi, le champ $\vec{E}$ est orthogonal aux plaques et orienté vers l'armature négative (x croissant).

2. a. L'action mécanique de la Terre est modélisée par le poids $P = m \cdot g$.
La force électrique a pour expression, en valeur, $F_e = e \cdot E$, d'où le rapport :
$\frac{F_e}{P} = \frac{e \cdot E}{m \cdot g}$ soit
$\frac{F_e}{P} = \frac{1{,}6 \times 10^{-19} \times 2{,}0 \times 10^{3}}{1{,}7 \times 10^{-27} \times 9{,}81} = 1{,}9 \times 10^{10}$.
L'action de la Terre est négligeable devant celle modélisée par la force électrique.

b. D'après la deuxième loi de Newton :
$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_e = e \cdot \vec{E}$, d'où $\vec{a} = \frac{e}{m} \cdot \vec{E}$.

3. a. Par projection, on obtient $ax = \frac{e \cdot E}{m}$.

b. Puisque $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, on obtient après intégration :
$v_x(t) = \frac{e \cdot E}{m} \cdot t + k_1$, où k_1 est une constante à déterminer.
Or, à $t = 0$ s, $\vec{v}(0) = v_0 \cdot \vec{i}$, d'où $k_1 = v_0$ et
$v_x(t) = \frac{e \cdot E}{m} t + v_0$.
De même, on obtient $x(t)$ après une deuxième intégration :
$x(t) = \frac{e \cdot E}{2m} t^2 + v_0 \cdot t$ car, à $t = 0$ s, le système est en O, d'abscisse 0.

c. L'accélérateur est linéaire car le mouvement de la particule s'effectue selon l'axe (Ox).

4. a. Le proton sort de l'accélérateur à l'instant t_s tel que $x(t_s) = d$.
t_s est donc la racine positive de l'équation du second degré en t suivante :
$\frac{e \cdot E}{2m} t^2 + v_0 \cdot t - d = 0$
Le discriminant de l'équation s'écrit :
$\Delta = v_0^2 + 4d\frac{e \cdot E}{2m} = v_0^2 + \frac{2e \cdot E \cdot d}{m}$,
Soit
$\Delta = (2{,}0 \times 10^3)^2 + \frac{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 2{,}0 \times 10^3 \times 18{,}0 \times 10^{-2}}{1{,}7 \times 10^{-27}}$
$= 6{,}8 \times 10^{10}$ SI.
La racine positive est : $t_s = \frac{-v_0 + \sqrt{\Delta}}{2\frac{e \cdot E}{2m}} = \frac{\left(-v_0 + \sqrt{\Delta}\right) \cdot m}{e \cdot E}$
Soit $t_s = \frac{\left(-2{,}0 \times 10^3 + \sqrt{6{,}8 \times 10^{10}}\right) \times 1{,}7 \times 10^{-27}}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 2{,}0 \times 10^3}$
$= 1{,}4 \times 10^{-6}$ s

b. $v_f = v_x\left(t_s\right) = \frac{e \cdot E}{m} \cdot t_s + v_0$ soit :
$v_f = \frac{1{,}6 \times 10^{-19} \times 2{,}0 \times 10^3}{1{,}7 \times 10^{-27}} \times 1{,}4 \times 10^{-6} + 2{,}0 \times 10^3$
$= 2{,}6 \times 10^5$ m · s^{-1}
On vérifie que ce condensateur plan joue le rôle d'accélérateur de particules.

15 **1. a.** D'après la deuxième loi de Newton :
$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_e = -e \cdot \vec{E}$,
d'où $\vec{a} = \frac{-e}{m} \cdot \vec{E}$

b. Dans le repère orthonormé (O ; x, y, z), puisque $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, on a :
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = a_x = 0 \\ \frac{dv_y}{dt} = a_y = -\frac{e \cdot E}{m} \\ \frac{dv_z}{dt} = a_z = 0 \end{cases}$$
Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles : $\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -\frac{e \cdot E}{m} t + k_2 \\ v_z(t) = k_3 \end{cases}$ où k_1 k_2 et k_3 sont des constantes.
La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des constantes par identification de deux termes égaux : $\overrightarrow{v(0)} = \overrightarrow{v_0}$, d'où :
$$\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(0) = -\frac{e \cdot E}{m} \times 0 + k_2 = v_0 \cdot \sin\alpha \\ v_z(0) = k_3 = 0 \end{cases}$$
D'où : $v_x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha$;
$v_y(t) = -\frac{e \cdot E}{m} t + v_0 \cdot \sin\alpha$.

c. De même, on obtient les coordonnées $x(t)$ et $y(t)$ après une deuxième intégration :
$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t \\ y(t) = \frac{1}{2} \times \frac{-e \cdot E}{m} t^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t \end{cases}$$ car, à $t = 0$ s, le système est en O de coordonnées (0 ; 0).

d. $z(t) = 0$, donc le mouvement s'effectue dans le plan (xOy).

2. a. Par substitution de la variable $t = \frac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}$ dans l'expression de $y(t)$, on obtient l'équation de la trajectoire de la particule :

$$y(x) = \frac{-e \cdot E}{2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} x^2 + x \cdot \tan\alpha$$

b. Il s'agit d'une portion de parabole.

3. a. Les coordonnées du point C sont $x_C = \ell$ et $y_C = 0$. En utilisant ces coordonnées, l'équation de la trajectoire devient :

$\frac{-e \cdot E}{2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \ell^2 + \ell \cdot \tan\alpha = 0$ d'où :

$\frac{e \cdot E}{2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \ell^2 = \ell \cdot \tan\alpha$.

Puis :

$e \cdot E \cdot \ell = 2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \tan\alpha$

$= 2m \cdot v_0^2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha$

$= m \cdot v_0^2 \cdot \sin 2\alpha$

Soit $\sin 2\alpha = \frac{e \cdot E \cdot \ell}{m \cdot v_0^2}$

b. $\sin 2\alpha = \frac{1{,}6 \times 10^{-19} \times 850 \times 20 \times 10^{-2}}{9{,}1 \times 10^{-31} \times (1{,}0 \times 10^7)^2}$

D'où $\alpha = 8{,}7°$.

› 3. Aspects énergétiques dans un champ uniforme

16 **1.** $E_m(0) = E_c(0) + E_{pp}(0) = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h$

2. a. La conservation s'applique en l'absence de force non conservative comme les forces de frottement. Ici, on peut raisonnablement négliger l'action de l'air sur le système car la boule de pétanque est dense.

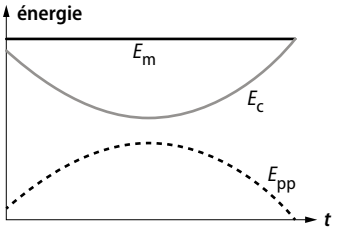
b. D'après la conservation de l'énergie mécanique, $E_m(0) = E_m(F)$.

$\frac{1}{2} m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v_F^2$, d'où :

$v_F = \sqrt{v_0^2 + 2g \cdot h}$

$v_F = \sqrt{6{,}0^2 + 2 \times 9{,}81 \times 1{,}35} = 7{,}9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.



17 *Cet exercice est en bleu sur le manuel élève et corrigé pour les élèves sur le site ressources.*

1. $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AB} = m \cdot \vec{g} \cdot \overrightarrow{AB} = m \cdot g(z_A - z_B)$

2. La variation d'énergie cinétique d'un système qui se déplace d'un point A à un point B est égale à la somme des travaux des forces qui modélisent les actions mécaniques qui s'appliquent sur le solide lors de son déplacement. Ici, seule l'action mécanique modélisée par le poids agit, d'où :

$\Delta E_c = E_{c_B} - E_{c_A} = W_{AB}(\vec{P})$.

Soit $\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g(z_A - z_B) = m \cdot g \cdot h$

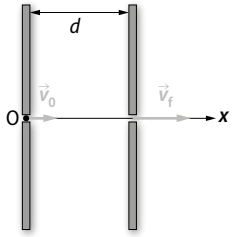
Ce qui donne :

$v_B = \sqrt{v_A^2 + 2g \cdot h}$

$v_B = \sqrt{6{,}0^2 + 2 \times 9{,}81 \times 1{,}35} = 7{,}9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

On aboutit pour v_B et pour v_F dans l'exercice précédent à la même expression, car $h = z_A - z_B$.

18 **1.**



Une particule peut être accélérée linéairement si elle pénètre à l'intérieur du condensateur plan avec un vecteur vitesse perpendiculaire aux armatures. L'armature de sortie doit être de charge opposée à celle de la particule.

2. a. D'après la conservation de l'énergie mécanique :

$E_m = E_c + E_{pé}$ = constante, donc $E_m(O) = E_m(f)$.

b. $\frac{1}{2} m \cdot v_0^2 + q \cdot V_A = \frac{1}{2} m \cdot v_f^2 + q \cdot V_B$

D'où :

$v_f^2 = v_0^2 + \frac{2q(V_A - V_B)}{m} = v_0^2 - \frac{2e \cdot U_{AB}}{m}$ car $q = -e$.

Soit $v_f = \sqrt{v_0^2 - \frac{2e \cdot U_{AB}}{m}}$

$v_f = \sqrt{(1{,}0 \times 10^3)^2 - \frac{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times (-1{,}0 \times 10^3)}{9{,}1 \times 10^{-31}}}$

$= 1{,}9 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. a. $W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = -e \cdot U_{AB}$ avec $U_{AB} < 0$.

Le travail est moteur.

b. $\Delta E_c = E_{c_B} - E_{c_A} = W_{AB}(\vec{F})$

D'où $\frac{1}{2} m \cdot v_f^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 = -e \cdot U_{AB}$, soit :

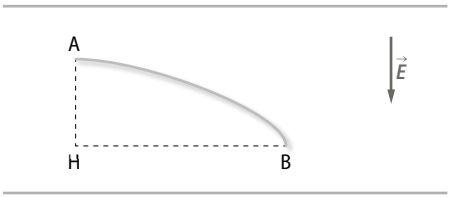
$v_f = \sqrt{v_0^2 - \frac{2e \cdot U_{AB}}{m}}$

Faire le point avant d'aller plus loin *p. 305*

◗ ***Exprimer le travail $W_{AB}(\vec{F}_e)$ pour une particule de charge q évoluant dans un condensateur plan.***

Dans un condensateur plan, le champ électrique $\vec{E}$ est uniforme.

La force $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$ est constante et donc conservative.



Le travail de la force électrique entre A et B est indépendant du chemin suivi et vaut

$W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot \vec{E} \cdot (\overrightarrow{AH} + \overrightarrow{HB})$

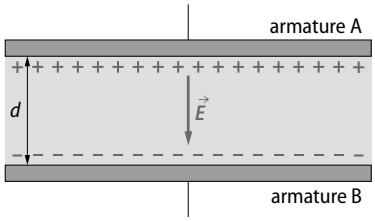
en passant par le point H, projeté de A sur la droite parallèle aux armatures passant par B :

$W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot \vec{E} \cdot$

$\overrightarrow{AH} + q \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{HB} = q \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{AH} + 0 = q \cdot U_{AH} = q \cdot U_{AB}$

car $\vec{E}$ et $\overrightarrow{HB}$ sont orthogonaux et car les potentiels électriques en H et en B sont égaux (les lignes parallèles aux armatures sont des équipotentielles).

◗ ***Représenter un condensateur plan. Décrire le champ électrique $\vec{E}$ à l'intérieur et indiquer de quels paramètres dépend $\vec{E}$.***



Le champ électrique à l'intérieur du condensateur plan est uniforme, de direction perpendiculaire aux deux armatures et orienté vers l'armature chargée négativement. Le champ électrique $\vec{E}$ dépend de la différence de potentiel électrique entre les deux armatures (la tension U_{AB} sur le schéma) et de la distance d entre les deux armatures :

$E = \dfrac{U_{AB}}{d}$

◗ ***Énoncer puis exprimer le théorème de l'énergie cinétique au cours d'une chute dans un champ de pesanteur uniforme.***

La variation d'énergie cinétique d'un système qui se déplace d'un point A à un point B est égale à la somme des travaux des forces qui modélisent les actions mécaniques qui s'appliquent sur le solide lors de son déplacement. Dans un champ de pesanteur uniforme, si on suppose que seule l'action mécanique modélisée par le poids agit, alors :

$\Delta E_c = E_{c_B} - E_{c_A} = W_{AB}(\vec{P})$

◗ ***Établir l'expression du vecteur $\vec{a}$ d'une particule de charge q dans un champ électrique $\vec{E}$ uniforme.***

Dans un champ électrique uniforme, on suppose qu'une particule de charge q n'est soumise qu'à l'action du champ électrique $\vec{E}$ uniforme car le poids $\vec{P}$ de la particule est négligeable devant la force électrique $\vec{F}_e$.

D'après la deuxième loi de Newton, on écrit :

$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$

D'où : $\vec{a} = \dfrac{q}{m}\vec{E}$.

◗ ***Décrire le principe de fonctionnement d'un accélérateur de particules.***

Les accélérateurs linéaires de particules sont constitués d'un ou plusieurs condensateurs plans associés en série. La particule chargée est placée dans un champ électrique et reçoit de l'énergie cinétique E_c par conversion de l'énergie potentielle électrique $E_{pé}$ (proportionnelle au potentiel électrique *V*) en énergie cinétique.

◗ ***Établir l'expression du vecteur accélération $\vec{a}$ d'un objet lors d'une chute dans un champ de pesanteur uniforme.***

Dans un champ de pesanteur $\vec{g}_0$ uniforme, on néglige les actions mécaniques autres que celle modélisée par le poids $\vec{P}$.

D'après la deuxième loi de Newton,

$m \cdot \vec{a} = \vec{P} = m \cdot \vec{g}_0$, d'où $\vec{a} = \vec{g}_0$.

◗ ***Écrire l'expression de la trajectoire pour un système, de centre de masse G, lancé depuis le point O dans le plan (xOy) avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ formant un angle α avec l'horizontale.***

On néglige l'action de l'air sur le système.

D'après la deuxième loi de Newton, $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}_0$, d'où $\vec{a} = \vec{g}_0$.

Dans le repère orthonormé (O ; *x, y*) :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \begin{cases} \dfrac{dv_x}{dt} = a_x = 0 \\ \dfrac{dv_y}{dt} = a_y = -g_0 \end{cases}$$

Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :

$$\vec{v}(t) \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + k_2 \end{cases}$$

où k_1 et k_2 sont des constantes.

La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux :

$$\vec{v}(0) = \vec{v}_0 \quad \text{d'où} \begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(0) = g_0 \times 0 + k_2 = v_0 \cdot \sin\alpha \end{cases}$$

Soit : $\vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin\alpha \end{cases}$

De même, puisque $\vec{v} = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{OG}}{\mathrm{d}t}$, après intégration et en connaissant la position initiale O, il vient :

$\overrightarrow{OG}(t)\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t \\ y(t) = -\dfrac{g_0}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t \end{cases}$

Par substitution de la variable $t = \dfrac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}$ dans l'expression de $y(t)$, on obtient l'équation :

$$y(x) = \frac{-g_0}{2v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} x^2 + x \cdot \tan\alpha$$

◗ ***Énoncer puis exprimer la conservation de l'énergie mécanique au cours du mouvement d'une particule dans un champ électrique uniforme.***

Dans un condensateur plan, le champ électrique $\vec{E}$ est uniforme. La force $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$ est constante et donc conservative. En l'absence de forces non conservatives comme les forces de frottement, l'énergie mécanique se conserve : $\Delta E_m = 0$, d'où : $\Delta E_c = -\Delta E_{p(élec)}$, avec $E_{p(élec)} = q \cdot V$.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 306 et 307

20 **1.** On néglige l'action de l'air sur le système.

D'après la deuxième loi de Newton, $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}_0$ d'où $\vec{a} = \vec{g}_0$.

Dans le repère orthonormé (O ; x, y),

$$\vec{a} = \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = \begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = a_x = 0 \\ \dfrac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = a_y = -g_0 \end{cases}$$

Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :

$\vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + k_2 \end{cases}$

où k_1 et k_2 sont des constantes.

La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux :

$\vec{v}(0) = \vec{v}_0$ d'où $\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(0) = -g_0 \times 0 + k_2 = v_0 \cdot \sin\alpha \end{cases}$

Soit : $\vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin\alpha \end{cases}$

De même, puisque $\vec{v} = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{OG}}{\mathrm{d}t}$, après intégration et en connaissant la position initiale O, il vient :

$\overrightarrow{OG}(t)\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t \\ y(t) = -\dfrac{g_0}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t \end{cases}$

2. Par substitution de la variable $t = \dfrac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}$ dans l'expression de $y(t)$, on obtient l'équation de la trajectoire du ballon :

$$y(x) = \frac{-g_0}{2v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} x^2 + x \cdot \tan\alpha$$

3. On suppose que le ballon est récupéré au niveau du sol. Le ballon touche le sol à l'instant t_f pour lequel $y(t_f) = 0$, soit $-\dfrac{g_0}{2} t_f^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t_f = 0$ d'où :

$t_f = \dfrac{2v_0 \cdot \sin\alpha}{g_0}$ soit $t_f = \dfrac{2 \times 10{,}0 \times \sin 60^\circ}{9{,}8} = 1{,}8$ s.

22 **1. a.** La variation d'énergie cinétique d'un système qui se déplace d'un point A à un point B est égale à la somme des travaux des forces qui modélisent les actions mécaniques qui s'appliquent sur le solide lors de son déplacement :

$\Delta E_c = \sum W_{AB}(\vec{F})$

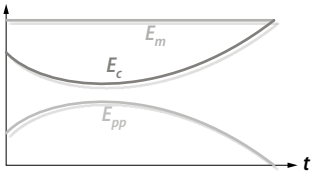
b. Ici, seule l'action mécanique modélisée par le poids agit d'où $\Delta E_c = E_{c_B} - E_{c_A} = W_{AB}(\vec{P})$.

Soit : $\dfrac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \dfrac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g(z_A - z_B) = m \cdot g \cdot h$, ce qui donne :

$v_B = \sqrt{v_A^2 + 2g \cdot h}$

$v_B = \sqrt{(12{,}0)^2 + 2 \times 9{,}8 \times 2{,}05} = 14$ m · s^{-1}.

2.



S'entraîner pour maîtriser

p. 308

23 **1. a.** D'après la deuxième loi de Newton, $\vec{a}(t) = \vec{g}$ d'où, après une première intégration :

$v_z(t) = -g \cdot t + v_0$ car $v_z(0) = v_0$.

Par une seconde intégration, $z(t) = \dfrac{-g}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t + h$ car, à $t = 0$, $z(0) = h$.

b. Le mouvement est rectiligne car il a lieu selon l'axe (Oz). $v_z(t)$ est une fonction affine décroissante du temps, donc le mouvement est ralenti lors de l'ascension.

2. a. Au sommet de la trajectoire, la vitesse verticale est nulle.

$v_z(t_a) = -g \cdot t_a + v_0 = 0$, d'où $t_a = \dfrac{v_0}{g}$.

b. $h_{max} = z(t_a) = \dfrac{-g}{2} \cdot t_a^2 + v_0 \cdot t_a + h$

Or $t_a = \dfrac{7{,}0}{9{,}81} = 0{,}71$ s, d'où :

$h_{max} = \dfrac{-9{,}81}{2} \times 0{,}71^2 + 7{,}0 \times 0{,}71 + 1{,}5 = 4{,}0$ m

24 **1. a.** La vitesse de lancement influe sur la portée et la flèche : les paramètres sont alors la valeur du vecteur vitesse, sa direction et son sens. Dans une chute libre, l'action de l'air est négligée.

b. On néglige l'action de l'air sur le projectile dans le cas d'une chute libre. D'après la deuxième loi de Newton, $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g_0}$, d'où $\vec{a} = \vec{g_0}$.

Dans le repère orthonormé (O ; *x*, *y*, *z*), puisque $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$, on a :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} \begin{cases} \dfrac{dv_x}{dt} = a_x = 0 \\ \dfrac{dv_y}{dt} = a_y = -g_0 \\ \dfrac{dv_z}{dt} = a_z = 0 \end{cases}$$

Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles : $\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + k_2 \\ v_z(t) = k_3 \end{cases}$, où k_1, k_2 et k_3 sont des constantes.

La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux : $\overrightarrow{v(0)} = \overrightarrow{v_0}$, d'où :

$$\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(0) = -g_0 \times 0 + k_2 = v_0 \cdot \sin\alpha \\ v_z(0) = k_3 = 0 \end{cases}$$

Soit :

$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin\alpha \\ v_x(t) = 0 \end{cases}$$

De même, puisque $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$, après intégration et en connaissant la position initiale O à $t = 0$ s, les équations horaires de la position s'écrivent :

$$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t \\ y(t) = -\dfrac{1}{2} g_0 \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t \\ z(t) = 0 \end{cases}$$

Par substitution de la variable $t = \dfrac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}$ dans l'expression de $y(t)$, on obtient l'équation de la trajectoire du projectile :

$y(x) = \dfrac{-g_0}{2v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} x^2 + x \cdot \tan\alpha$.

2. a. On peut chercher l'abscisse X pour laquelle la dérivée par rapport à x de $y(x)$ s'annule.

$y'(X) = \dfrac{-g_0}{v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} X + \tan\alpha = 0$ d'où :

$X = \dfrac{v_0^2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \tan\alpha}{g_0} = \dfrac{v_0^2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha}{g_0}$

et $y_{max} = y(X)$.

$$y(X) = \frac{-g_0}{2v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \times \left(\frac{v_0^2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha}{g_0} \right)^2 + \frac{v_0^2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha}{g_0} \tan\alpha = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2\alpha}{2g_0}$$

Remarque : on peut également chercher t' pour lequel $v_y(t') = 0$, puis exprimer $y(t')$.

b. La flèche sera maximale si $\sin^2\alpha$ est maximal, soit pour $\alpha = 90°$. Cela correspond à un lancer vertical vers le haut (dangereux au javelot !).

3. a. La portée est obtenue à l'instant t_p tel que $y(t_p) = 0$ m, soit pour :

$y(t_p) = -\dfrac{1}{2} g_0 \cdot t_p^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t_p = 0$ d'où :

$t_p = \dfrac{2v_0 \cdot \sin\alpha}{g_0}$ et la portée vaut :

$$x_{max} = x(t_p) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t_p = \frac{2v_0^2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha}{g_0} = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g_0}$$

b. La portée sera maximale si $\sin 2\alpha$ est maximal, soit pour $\alpha = 45°$.

4. D'après les expressions précédentes, si la vitesse de lancement est doublée, alors la flèche et la portée sont quadruplées.

25 **1.** On peut rentrer les valeurs de temps en microseconde et de distance en centimètre mais il faudra tenir compte des unités choisies dans le calcul de la vitesse, qui doit être exprimée en m · s^{-1}.

2. a. $v_x(t_i) = \dfrac{x(t_{i+1}) - x(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}}$

C3 | =(10^-2*(B4-B2)/10^-6*(A4-A2))

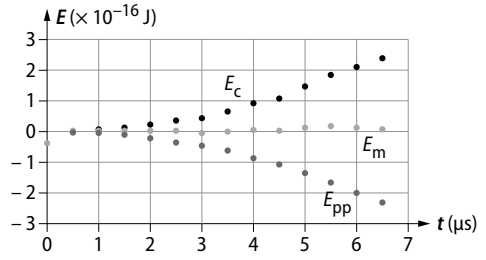
	A	B	C	D	E	F
1	t	x	v			
2	0	0				
3	0,5	0,02	9000			
4	1	0,9				

b. Le mouvement de la particule est rectiligne accéléré.

3. a. $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$; $E_{p(élec)} = e \cdot E \cdot x$;
$E_m = E_c + E_{p(élec)}$

t	x	v	Ec	Epp	Em
0	0				
0,5	0,02	9000	1,539E-18	-1,28E-19	1,411E-18
1	0,9	18800	6,7154E-18	-5,76E-18	9,5536E-19
1,5	1,9	25000	1,1875E-17	-1,216E-17	-2,85E-19
2	3,4	34000	2,1964E-17	-2,176E-17	2,04E-19
2,5	5,3	43000	3,5131E-17	-3,392E-17	1,211E-18
3	7,7	48000	4,3776E-17	-4,928E-17	-5,504E-18
3,5	10,1	58000	6,3916E-17	-6,464E-17	-7,24E-19
4	13,5	69000	9,0459E-17	-8,64E-17	4,059E-18
4,5	17	75000	1,0688E-16	-1,088E-16	-1,925E-18
5	21	88000	1,4714E-16	-1,344E-16	1,2736E-17
5,5	25,8	98000	1,8248E-16	-1,6512E-16	1,7356E-17
6	30,8	105000	2,0948E-16	-1,9712E-16	1,2355E-17
6,5	36,3	112000	2,3834E-16	-2,3232E-16	6,016E-18

b.



Il y a conservation de l'énergie mécanique, l'énergie potentielle électrique est convertie en énergie cinétique au cours du mouvement dans le condensateur plan.

26 **1.** On néglige l'action de l'air sur la balle.

D'après la deuxième loi de Newton, $m \cdot \vec{a} = m \cdot \overrightarrow{g_0}$ d'où :

$$\vec{a} = \overrightarrow{g_0} = \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g_0 \\ a_z = 0 \end{cases}$$

2. a. Dans le repère orthonormé (O ; *x*, *y*, *z*), puisque $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :

$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + k_2 \end{cases},$$

où k_1 et k_2 sont des constantes.

La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification des deux termes égaux : $\overrightarrow{v(0)} = \overrightarrow{v_0}$, d'où :

$$\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \\ v_y(0) = -g_0 \times 0 + k_2 = 0 \end{cases}$$

Soit $\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t \end{cases}$

De même, puisque $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$, après intégration et en connaissant la position initiale D à $t = 0$ s, les équations horaires de la position s'écrivent :

$$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t \\ y(t) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot t^2 + H \end{cases}$$

b. La courbe **A** représente $v_x(t) = v_0$. La courbe **B** représente $y(t) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot t^2 + H$ car elle est d'allure parabolique. La courbe **C** représente $x(t) = v_0 \cdot t$ car la position $x(t)$ augmente proportionnellement au temps. La courbe **D** représente $v_y(t) = -g_0 \cdot t$.

3. a. Par substitution de la variable $t = \frac{x}{v_0}$ dans l'expression de $y(t)$, on obtient l'équation de la trajectoire de la balle :

$$y(x) = \frac{-g_0}{2{v_0}^2} x^2 + H.$$

b. La balle passe au-dessus du filet car :

$$y(12{,}2) = \frac{-9{,}81}{2 \times \left(\frac{126}{3{,}6}\right)^2} \times 12{,}2^2 + 2{,}20$$
$$= 1{,}60 \text{ m} > 0{,}92 \text{ m}$$

c. On cherche l'abscisse x pour laquelle $y(x) = 0$, soit :

$y\left(x\right) = \frac{-g_0}{2v_0^2} x^2 + H = 0$, d'où :

$$x = v_0 \sqrt{\frac{2H}{g_0}}$$

Soit $x = \frac{126}{3{,}6} \times \sqrt{\frac{2 \times 2{,}20}{9{,}81}} = 23{,}4 \text{ m} > 18{,}7 \text{ m}$.
Le service est raté.

4. a. $W_{DB}\left(\vec{P}\right) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{DB} = m \cdot \vec{g} \cdot \overrightarrow{DB}$
$= m \cdot g(z_D - z_B) = m \cdot g \cdot H$

b. D'après le théorème de l'énergie cinétique :
$\Delta E_c = \Delta E_c = E_{c_B} - E_{c_D} = W_{DB}(\vec{P})$.

Soit $\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 = m \cdot g_0 \cdot H$, ce qui donne :
$v_B = \sqrt{v_0^2 + 2g_0 \cdot H}$, soit :

$v_B = 35{,}6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 128\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

c. Le gain en vitesse est faible même si on frappe à 2,20 m de hauteur. En revanche, frapper haut la balle permet de pouvoir mieux placer la balle entre le filet et la ligne de service de l'adversaire.

27 **1.** $E_m(0) = E_c(0)$ car $E_p(0) = 0$ J.

$$E_c(0) = \frac{1}{2} \times 45 \times 10^{-3} \times 12{,}0^2 = 3{,}24\ \text{J}$$

$$u\left(E_m(0)\right) = u\left(E_c(0)\right) = E_c(0) \times \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{u(v)}{v}\right)^2}$$

d'où :

$$u\left(E_c(0)\right) = 3{,}24 \times \sqrt{\left(\frac{0{,}5}{45}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{0{,}1}{12{,}0}\right)^2} = 0{,}07\ \text{J}.$$

Par convention, on ne retient qu'un seul chiffre significatif arrondi au chiffre supérieur.

$E_m(0) = 3{,}24 \pm 0{,}07$ J

2. a. En l'absence de force non conservative comme les forces de frottement, d'après la conservation de l'énergie mécanique : $E_m(0) = E_m(F)$.

$\frac{1}{2} m \cdot v_0^2 = m \cdot g_0 \cdot h$, car $v_F = 0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ au sommet de la trajectoire. On en déduit $h = \frac{v_0^2}{2g_0}$.

b. $h = \frac{12{,}0^2}{2 \times 9{,}81} = 7{,}33$ m et :

$$u(h) = h \times 2\left(\frac{U(v_0)}{v_0}\right) = 7{,}33 \times 2 \times \frac{0{,}1}{12{,}0} = 0{,}2\ \text{m}.$$

Par convention, on ne retient qu'un seul chiffre significatif arrondi au chiffre supérieur. Finalement, $h = 7{,}3 \pm 0{,}2$ m.

3. La mesure n'appartient pas à l'intervalle précédent, donc l'hypothèse de la question **2. a.** n'était pas valide. Il faut tenir compte des forces de frottement.

28 **1.** Une cavité peut être modélisée par un condensateur plan. En effet, les deux sections de tube consécutives sont parallèles et de charges opposées.

2. a. Le système a son énergie cinétique qui augmente. De l'énergie potentielle électrique est convertie en énergie cinétique.

b. D'après la conservation de l'énergie mécanique, $E_m = E_c + E_{pé} = c^{ste}$.

D'où le gain en énergie cinétique :

$\Delta E_c = -\Delta E_{pé} = -(E_{pé}(B) - E_{pé}(A)) = q(V_A - V_B) = q \cdot U_{AB}$

3. a. Le gain en énergie est identique pour toutes les cavités si la tension électrique est la même.

Remarque : Cela impose une bonne synchronisation, car la tension délivrée est alternative. La longueur de chaque tube est calculée pour assurer cette synchronisation (voir exercice 36)

b. Pour un proton de charge e et 12 tubes :

$\Delta E = 12e \cdot U_{AB} = 12 \times 1{,}0 \times 10^5\ \text{eV} = 1{,}2 \times 10^6\ \text{eV}$.

Soit $\Delta E = 1{,}2 \times 10^6 \times 1{,}6 \times 10^{-19} = 1{,}9 \times 10^{-13}$ J.

29 ***L'expérience de Cockcroft et Walton***

En 1932, John Cockcroft et Ernest Walton (tous deux prix Nobel de physique en 1951) ont réalisé la première fission artificielle d'un noyau d'atome en bombardant une cible de lithium par des protons accélérés. Il s'agissait alors aussi de la première transmutation artificielle utilisant des particules accélérées. Pour produire l'importante tension continue nécessaire à l'accélération des protons, ils ont utilisé des transformateurs de tension, des redresseurs de tension et des condensateurs. Les protons étaient accélérés dans le vide et projetés contre des atomes de lithium, ce qui produisait des noyaux d'hélium et de l'énergie. Cette transformation a constitué la première preuve expérimentale de la relation d'équivalence masse-énergie d'Einstein $E = m \cdot c^2$.

1. a. *Quel type de transformation est évoqué ici ?*

b. *Pourquoi les protons sont-ils accélérés dans ce dispositif ? Expliquer la présence de vide.*

2. *Le proton, initialement considéré au repos, atteint finalement une vitesse de* $1{,}2 \times 10^7\ m \cdot s^{-1}$. *Calculer la tension électrique nécessaire pour atteindre une telle vitesse.*

1. a. Il s'agit d'une transformation nucléaire qui affecte le noyau des atomes.

b. Les protons sont des particules chargées soumises à un champ électrique dû à la tension appliquée dans le dispositif. Le vide permet d'éviter des collisions parasites de particules avec les molécules d'air.

2. D'après le théorème de l'énergie cinétique :

$\Delta E_c = E_{c_B} - E_{c_A} = W_{AB}(\vec{F})$, où $\vec{F}$ représente le vecteur force électrique.

$$\text{Or } W_{AB}\left(\vec{F}\right) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = e \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB}$$

$$= e \cdot E \cdot AB = e \cdot U_{AB}$$

On suppose que $\vec{E}$ et $\overrightarrow{AB}$ sont colinéaires et que le travail est maximal.

D'où $\frac{1}{2} m \cdot v_F^2 = e \cdot U_{AB}$.

Soit : $U_{AB} = \frac{m \cdot v_F^2}{2e}$

$$U_{AB} = \frac{1{,}7 \times 10^{-27} \times \left(1{,}2 \times 10^7\right)^2}{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19}} = 7{,}7 \times 10^5\ \text{V}.$$

30 **1. a.** On néglige l'action de la Terre devant celle modélisée par la force électrique.
D'après la deuxième loi de Newton :

$m \cdot \vec{a} = \vec{F_e} = -e \cdot \vec{E}$, d'où $\vec{a} = \frac{-e}{m} \cdot \vec{E}$.

Par projection, on obtient $a_x(t) = 0$ et $a_y(t) = \frac{e \cdot E}{m}$ car $\vec{E}$ est orienté vers le bas.
Après deux intégrations, on obtient :

$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \\ v_y(t) = \frac{e \cdot E}{m} t \end{cases}$ car, à $t = 0$ s, $\overrightarrow{v(0)} = v_0 \vec{i}$.

Puis :

$\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t \\ y(t) = \frac{1}{2} \frac{e \cdot E}{m} \cdot t^2 \end{cases}$

car, à $t = 0$ s, le système est en O (0 ; 0).

Par substitution de la variable $t = \frac{x}{v_0}$, on obtient :

$y(x) = \frac{e \cdot E}{2m \cdot {v_0}^2} x^2$

Le mouvement est plan car $z(t) = 0$.

b. $y(L) = \frac{e \cdot E}{2m \cdot {v_0}^2} L^2 = h$, d'où :

$\frac{e}{m} = \frac{2h \cdot v_0^2}{E \cdot L^2}$, d'où :

$\frac{e}{m} = \frac{2 \times 1{,}85 \times 10^{-2} \times (2{,}27 \times 10^7)^2}{15{,}0 \times 10^3 \times (8{,}50 \times 10^{-2})^2}$

$= 1{,}76 \times 10^{11}$ C · kg^{-1}

2. a. $u\left(\frac{e}{m}\right) =$

$1{,}76 \times \sqrt{\left(\frac{0{,}05}{1{,}85}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{15}\right)^2 + 4\left(\frac{0{,}02)}{2{,}27}\right)^2 + 4\left(\frac{0{,}05}{8{,}50}\right)^2}$

$= 7 \times 10^9$ C · kg^{-1}

On ne retient qu'un chiffre significatif arrondi à l'excès, par convention.

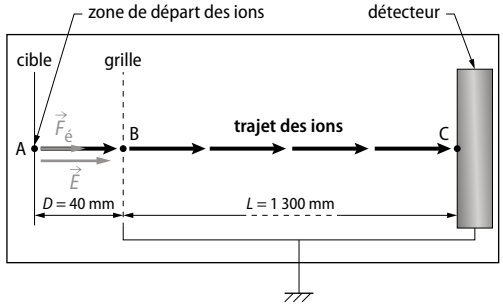
b. Finalement, $\frac{e}{m} = 1{,}76 \pm 0{,}07 \times 10^{11}$ C · kg^{-1}.
La valeur de référence est bien dans l'encadrement, mais l'incertitude-type est grande.

31 **Pistes pour l'exposé oral**
L'élève pourra présenter :
– les points communs entre tous les accélérateurs linéaires ;
– les différents types de particules (élémentaires ou non) ;
– les applications en traitement médical et les différentes solutions techniques retenues suivant la pathologie ;
– le rôle en recherche fondamental à travers l'exemple du CERN ou de l'accélérateur de Stanford (USA) ;
– l'importance du magnétisme dans ces dispositifs.

32 **Pistes pour l'exposé oral**
L'élève pourra présenter la nature de la trajectoire de l'avion en vol parabolique, les termes micropesanteur et impesanteur et la nature des expériences qui peuvent être réalisées en micropesanteur. Il ou elle pourra expliquer les différentes phases successives du vol et raisonner en termes de référentiel.

Développer ses compétences p. 311

33 **› Analyse**
1. a. et **b.** Les ions sont chargés positivement et $\vec{F_é} = q \cdot \vec{E}$, donc $\vec{F_é}$ et $\vec{E}$ sont de même direction et de même sens. Le champ électrique dépend de la distance d entre les armatures et de la tension U_{AB} entre les deux armatures.



2. D'après le théorème de l'énergie cinétique, l'énergie cinétique E_c(B) d'un fragment au point B est égale au travail de la force électrique qu'il subit entre les points A et B :
$E_c(B) = W_{AB}(\vec{F})$ car $E_c(A) = 0$ J, soit :

$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB$

Comme $F = e \cdot E$, alors $F \cdot AB = e \cdot U$.
On obtient $\frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U$ et, finalement $v = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m}}$ en ne conservant que la solution positive.

$v = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 20 \times 10^3}{7{,}1 \times 10^{-26}}} = 3{,}0 \times 10^5$ m · s^{-1}.

3. L'action de la Terre est négligeable car les masses des fragments sont infimes. D'après la première loi de Newton, en l'absence de forces qui s'exercent sur le système, le mouvement du système est rectiligne uniforme.

4. Le temps de vol Δt est la durée pour qu'un fragment parcoure la distance entre la cible et le

détecteur : $\Delta t = t_{CG} + t_{GD}$, avec t_{CG} la durée du parcours entre la cible et la grille et t_{GD} celle entre la grille et le détecteur.
Soit L la distance séparant la grille du détecteur. Alors, le fragment ayant un mouvement rectiligne et uniforme à la vitesse v, on a :
$v = \dfrac{L}{t_{GD}}$, soit $t_{GD} = \dfrac{L}{v} = L\sqrt{\dfrac{m}{2e \cdot U}}$.
Entre la cible et la grille, la durée t_{CG} s'obtient en appliquant la deuxième loi de Newton au fragment de masse m constante, dans le référentiel terrestre supposé galiléen :
$t_{GD} = \dfrac{L}{v} = L\sqrt{\dfrac{m}{2e \cdot U}}$ donc $e \cdot \vec{E} = m \cdot \vec{a}$, soit $\vec{a} = \dfrac{e \cdot \vec{E}}{m}$
Or $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$, donc $\dfrac{d\vec{v}}{dt} = \dfrac{e \cdot \vec{E}}{m}$.
En projetant sur un axe horizontal orienté positivement vers le détecteur et d'origine A, il vient $\dfrac{dv_x}{dt} = \dfrac{e \cdot E}{m}$ soit, par intégration :
$v_x(t) = \dfrac{e \cdot E}{m}t + k_1$
À $t = 0$, en A, le fragment ayant une vitesse nulle, $v_x(0) = 0$, donc $0 + k_1 = 0$.
Soit $v_x(t) = \dfrac{e \cdot E}{m}t$. Comme $v_x = \dfrac{dx}{dt}$, par intégration, on obtient : $x(t) = \dfrac{e \cdot E}{2m}t^2 + k_2$.
En $t = 0$ s, le fragment est en A, origine du repère : $x(t = 0) = 0$, donc $k_2 = 0$.
En $t = t_{CG}$, on a $x(t_{CG}) = \dfrac{e \cdot E}{2m}t_{CG}^2 = D$.
Alors $t_{CG} = \sqrt{\dfrac{D \cdot 2m}{e \cdot \dfrac{U}{D}}} = \sqrt{\dfrac{D^2 \cdot 2m}{e \cdot U}} = = D \cdot \sqrt{\dfrac{2m}{e \cdot U}}$.
Finalement, $\Delta t = D \cdot \sqrt{\dfrac{2m}{e \cdot U}} + L \cdot \sqrt{\dfrac{m}{2e \cdot U}}$.

$$\Delta t = 0{,}040 \times \sqrt{\frac{2 \times 7{,}1 \times 10^{-26}}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 20 \times 10^3}} + 1{,}300 \times \sqrt{\frac{7{,}1 \times 10^{-26}}{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 20 \times 10^3}} = 4{,}6 \times 10^{-6} \text{ s}$$

› Synthèse
Le temps de vol Δt est proportionnel à $\sqrt{m}$, avec m la masse des fragments. Les fragments de la molécule ayant des masses différentes, ils sont détectés les uns après les autres. Les fragments les plus légers sont détectés avant les plus lourds. De plus, le temps de vol Δt augmente lorsque la distance L augmente. Le détecteur pourra d'autant mieux discriminer les fragments que la distance L choisie est grande.

34 › Questions préliminaires
1. a. On néglige l'action de l'air sur le ballon.
D'après la deuxième loi de Newton, $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}$ d'où :
$\vec{a} = \vec{g} = \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$
b. Dans le repère orthonormé (O ; x, y), puisque $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$, par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :
$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g \cdot t + k_2 \end{cases}$,
où k_1 et k_2 sont des constantes.
La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux : $\overrightarrow{v(0)} = \overrightarrow{v_0}$, d'où :
$\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \\ v_y(0) = -g \times 0 + k_2 = 0 \end{cases}$
Soit $\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \\ v_y(t) = -g \cdot t \end{cases}$
De même, puisque $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$, après intégration et en connaissant la position initiale D à $t = 0$ s, les équations horaires de la position s'écrivent :
$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x_B(t) = v_0 \cdot t \\ y_B(t) = -\dfrac{1}{2}g \cdot t^2 + h \end{cases}$
$z(t) = 0$, donc le mouvement s'effectue dans le plan (xOy).
c. Par substitution de la variable $t = \dfrac{x_B}{v_0}$ dans l'expression de $y_B(t)$, on obtient l'équation de la trajectoire du ballon :
$y_B\left(x_B\right) = \dfrac{-g}{2{v_0}^2}x_B^2 + h$.
2. Le joueur J est situé sur la ligne de fond en $x_J = L =$ 18,0 m à la date $t = 0$ s et se déplace vers le filet avec une vitesse v_J, à déterminer, afin de réceptionner le ballon au point R.
Dans le repère choisi, l'équation horaire du joueur sur l'axe des abscisses est alors :
$x_J(t) = L - v_J \cdot t$
› Problématique
On cherche débord à déterminer si le service est valide.

Le ballon passe-t-il le filet ? Il faut calculer l'altitude du système à $x = 9$ m : $y(9) = 2{,}6 > 2{,}4$ m, altitude du filet (même en tenant compte du rayon r de 10 cm du ballon).
Le ballon touche-t-il le sol avant la ligne de fond ? Lorsque le ballon touche le sol, alors $y(x) = r$. Il touche le sol avant la ligne de fond si la solution de l'équation $y(x) = 0{,}10$ m donne une valeur de x inférieure L.

$r = -\dfrac{g \cdot x^2}{2v_0^2} + h$, d'où $x^2 = \dfrac{2v_0^2(h - r)}{g}$.

$x = v_0\sqrt{\dfrac{2(h-r)}{g}}$

$x = 21{,}0 \times \sqrt{\dfrac{2 \times (3{,}5 - 0{,}10)}{9{,}81}} = 17 \text{ m} < L$

On cherche maintenant à savoir si le receveur peut rattraper le ballon de façon réaliste.
Le centre du ballon touche le sol avant la ligne de fond. On obtient donc le système suivant :

$\begin{cases} x_B(t_R) = x_J(t_R) \\ y_B(t_R) = y_J(t_R) \end{cases}$

Soit : $\begin{cases} v_0 \cdot t_R = L - v_J \cdot t_R \quad (1) \\ -\dfrac{1}{2}g \cdot t_R^2 + h = h_R + r \quad (2) \end{cases}$

D'après l'équation (2) ; on a :

$t_R = \sqrt{\dfrac{2(h - h_R - r)}{g}}$.

$t_R = \sqrt{\dfrac{2 \times (3{,}5 - 0{,}80 - 0{,}10)}{9{,}81}} = 0{,}73$ s

En reportant t_R dans l'équation (1), on calcule la valeur de v_J.

$v_0 \cdot t_R = L - v_J \cdot t_R$, d'où $v_J = \dfrac{L}{t_R} - v_0$

et $v_J = 3{,}7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 13 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
Ce résultat semble réaliste.

35 › Démarche experte

Voir Démarche avancée : le modèle de la chute libre n'est pas adapté car il faut prendre en compte l'action de l'air.

› Démarche avancée

1. D'après la deuxième loi de Newton :

$m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}_0$ d'où $\vec{a} = \vec{g}_0 = \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g_0 \\ a_z = 0 \end{cases}$

2. Puisque $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$, par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :

$\vec{v}(t) \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + k_2 \end{cases}$

où k_1 et k_2 sont des constantes.
La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux : $\vec{v}(0) = \vec{v}_T$

D'où : $\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_T \cdot \cos\alpha \\ v_y(0) = -g_0 \times 0 + k_2 = -v_T \cdot \sin\alpha \end{cases}$

Soit : $\vec{v}(t) \begin{cases} v_x(t) = v_T \cdot \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t - v_T \cdot \sin\alpha \end{cases}$

De même, comme $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{TG}}{dt}$, après intégration et en connaissant la position initiale T à $t = 0$ s, les équations horaires de la position s'écrivent :

$\overrightarrow{TG}(t) \begin{cases} x(t) = v_T \cdot \cos\alpha \cdot t \\ y(t) = -\dfrac{1}{2}g_0 \cdot t^2 - v_T \cdot \sin\alpha \cdot t \end{cases}$

3. Par substitution de la variable $t = \dfrac{x}{v_T \cdot \cos\alpha}$ dans l'expression de $y(t)$, on obtient l'équation de la trajectoire :

$y(x) = \dfrac{-g_0}{2} \cdot \left(\dfrac{x}{v_T \cdot \cos\alpha}\right)^2 - v_T \cdot \sin\alpha \cdot \dfrac{x}{v_T \cdot \cos\alpha}$

$= \dfrac{-g_0}{2v_T^2 \cdot \cos^2\alpha}x^2 - \tan\alpha \cdot x$

$y(x) = \dfrac{-9{,}81}{2 \times \left(\dfrac{83{,}3}{3{,}6}\right)^2 \times (\cos 11°)^2}x^2 - \tan 11° \cdot x$

$= -9{,}5 \times 10^{-3}x^2 - 1{,}9 \times 10^{-1}x$

4. a. La piste a pour équation $y = -0{,}59x$. Le point L d'abscisse x_L appartient à la fois à la piste et à la trajectoire du sauteur donc :
$-0{,}59x_L = -9{,}5 \times 10^{-3}x_L^2 - 1{,}9 \times 10^{-1}x_L$
Soit : $9{,}5 \times 10^{-3}x_L^2 + 1{,}9 \times 10^{-1}x_L - 0{,}59\,x_L$
$= 9{,}5 \times 10^{-3}x_L^2 - 0{,}40\,x_L = 0$
Cette égalité est vérifiée si $x_L = 0$ ou si $9{,}5 \times 10^{-3}\,x_L - 0{,}40 = 0$, soit $x_L = 42$ m.

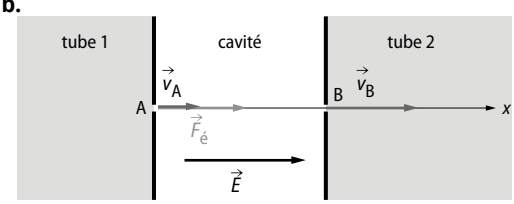
b. Le modèle théorique indique que l'abscisse du point d'atterrissage est très inférieure à l'abscisse réelle, égale à 97 m. L'air a probablement exercé une action motrice de poussée grâce au vent.

36 **1.** À l'intérieur des tubes, le champ électrique est nul. Si on néglige l'action de la Terre sur les particules, alors, d'après la première loi de Newton, le mouvement à l'intérieur des tubes est rectiligne uniforme car le système n'est soumis à aucune

action mécanique. Les zones d'accélération se situent dans les cavités entre les tubes.

2. a. La particule est un proton chargé positivement, donc le tube 2 doit être chargé négativement et le tube 1 positivement.

b.



c. $W_{AB}(\vec{F}_é) = \vec{F}_é \cdot \overrightarrow{AB} = e \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = e \cdot E \cdot AB$

$\vec{E}$ et $\overrightarrow{AB}$ sont colinéaires, donc le travail est maximal.

d. $\Delta E_c = E_{c_B} - E_{c_A} = W_{AB}(\vec{F}_é)$ d'où :

$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = e \cdot U_{AB}$.

Soit, puisque la vitesse v_A est négligeable :

$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = e \cdot U_{AB}$

D'où $v_B = \sqrt{\frac{2e \cdot U_{AB}}{m}} = \sqrt{\frac{2e \cdot E \cdot AB}{m}}$.

$$v_B = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 100 \times 10^3 \times 2{,}0 \times 10^{-2}}{1{,}7 \times 10^{-27}}}$$
$$= 6{,}1 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. a. À cet instant, le tube 2 doit être chargé positivement pour repousser le proton. Le potentiel électrique du tube change donc de signe et doit être relié à un générateur de tension alternatif.

b. Le proton traverse le tube 2 de longueur ℓ_2 à la vitesse v_B, il met une durée $\tau = \frac{\ell_2}{v_B}$. Pendant cette traversée, le signe du potentiel du tube 2 doit changer, donc une demi-période $\frac{T}{2}$ pour le signal alternatif doit s'écouler. D'où $\frac{T}{2} = \tau = \frac{\ell_2}{v_B}$, soit :

$\ell_2 = \frac{v_B \cdot T}{2} = \frac{v_B}{2f}$

$\ell_2 = \frac{6{,}1 \times 10^5}{2 \times 25 \times 10^6} = 1{,}2$ cm.

c. Les tubes doivent être de plus en plus longs pour que le passage de la particule soit synchronisé avec le changement de signe de charge portée par les tubes. En effet, puisque f ne varie pas, alors d'après la relation $\ell_2 = \frac{v_B}{2f}$, la longueur doit varier proportionnellement à la vitesse de la particule.

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 314

1. Proposition de protocole expérimental

Ouvrir la vidéo avec un logiciel de pointage.
Étalonner la vidéo : 3,00 m séparent la ligne de lancer et le cercle au sol. Orienter l'axe des x vers la gauche pour obtenir des valeurs positives selon x.
Placer l'origine du repère au centre du ballon lors du lâcher.
Démarrer le pointage en visant le centre de masse du ballon au moment du lâcher.
Afficher Y=f(X) sur le tableur-grapheur.
Modéliser la courbe par une parabole et tester sa validité en mesurant l'écart entre le modèle et les points expérimentaux.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. On néglige l'action de l'air sur le système.

D'après la deuxième loi de Newton, $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g_0}$ d'où $\vec{a} = \vec{g_0}$. Dans le repère orthonormé (O ; x, y) :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = a_x \\ \frac{dv_y}{dt} = a_y = -g_0 \end{cases}$$

Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles : $\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + k_2 \end{cases}$ où k_1 et k_2 sont des constantes.

La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des deux constantes par identification de deux termes égaux : $\overrightarrow{v(0)} = \overrightarrow{v_0}$, d'où :

$\begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(0) = g_0 \times 0 + k_2 = v_0 \cdot \sin\alpha \end{cases}$, soit :

$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin\alpha \end{cases}$

De même, puisque $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$, après intégration, les équations horaires de la position s'écrivent :

$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t + k_3 \\ y(t) = -\frac{g_0}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t + k_4 \end{cases}$

et, en connaissant la position initiale O, il vient

$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \cdot t \\ y(t) = -\frac{g_0}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin\alpha \cdot t \end{cases}$

Par substitution de la variable $t = \frac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}$ dans l'expression de $y(t)$, on obtient l'équation de la trajectoire du ballon :

$$y(x) = \frac{-g_0}{2v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} x^2 + x \cdot \tan\alpha$$

2. En se basant sur les neuf premiers points de la vidéo après le lâcher du ballon, on obtient pour modèle une parabole d'équation :

$$y(x) = \frac{-0{,}568}{2} x^2 + 1{,}24x + 0{,}007$$

3. Par identification des coefficients en x^2 et en x dans l'équation, on détermine les paramètres de lancement du ballon : $\alpha = 51°$, puis $v_0 = 6{,}6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. Pour déterminer si le lancer sera réussi, on calcule la position x du centre d'inertie du ballon pour l'altitude $y = 0{,}65$ m correspondant à l'altitude du panier (la référence des altitudes est prise au centre du ballon au moment du lâcher).
On résout l'équation :

$$0{,}65 = \frac{-0{,}568}{2} \times x^2 + 1{,}24 \times x + 0{,}007,$$

ce qui donne $x = 3{,}76$ m (seule solution positive).
Le panier mesure 0,45 m de large et son extrémité se situe à $x = 3{,}50$ m de l'origine. Donc le ballon devrait passer au milieu du panier.

5. La principale source d'incertitude est liée ici à la vidéo dont l'axe de visée n'est pas parfaitement perpendiculaire au plan du mouvement. Le pointage du centre d'inertie du ballon et l'étalonnage peuvent constituer d'autres sources d'incertitudes.

CHAPITRE 13

Manuel p. 316

Mouvement dans un champ de gravitation

LE PROGRAMME

2. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Mouvement dans un champ de gravitation. Mouvement des satellites et des planètes. Orbite.	Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien.
Lois de Kepler. Période de révolution. Satellite géostationnaire.	Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire. **Capacité numérique :** Exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 316

SITUATION 1

Il s'agit de vérifier que la notion de force gravitationnelle vue en Première est bien acquise.

› Exemple de réponse attendue

La force gravitationnelle maintient Titan autour de Saturne.
Titan est susceptible d'avoir une trajectoire circulaire, puisqu'il va tourner autour de Saturne.

› En classe de Terminale

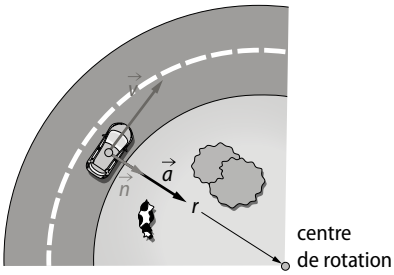
Les élèves doivent savoir appliquer la force gravitationnelle à un objet céleste et pouvoir l'appliquer à la deuxième loi de Newton.

SITUATION 2

Il s'agit de vérifier que la notion de vecteur accélération dans un mouvement circulaire uniforme, vue au chapitre 10, est bien acquise.

› Exemple de réponse attendue

L'accélération se détermine par la relation suivante : $\vec{a} = \frac{v^2}{r}\vec{n}$, $\vec{n}$ étant le vecteur unitaire lié au repère de Frenet dont l'origine est le centre de gravité de la voiture.



La valeur de cette accélération est :

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(\frac{50}{3{,}6}\right)^2}{50} = 3{,}9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Cela correspond à une accélération de 0,4 g.

› En classe de Terminale

Les élèves doivent être capables d'utiliser le repère de Frenet pour un mouvement circulaire et de représenter les vecteurs accélération et vitesse dans ce type de repère.

ACTIVITÉS

p. 318 ACTIVITÉ 1

Le système solaire à travers les siècles

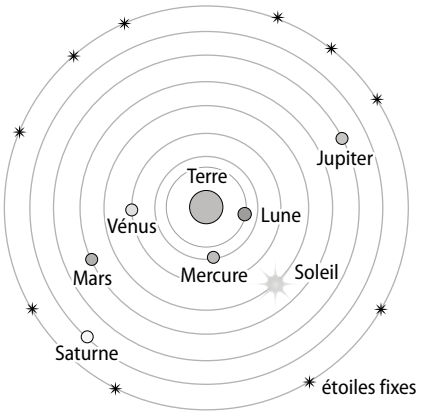
Commentaires pédagogiques

Cette activité revient sur l'histoire de la découverte du modèle héliocentrique. Elle permet d'aborder la notion d'orbite.

› Exploitation et analyse

1. a. Le modèle d'Aristote ne permet pas d'expliquer simplement les trajectoires rétrogrades, les variations de vitesse et d'intensité lumineuse observées pour certaines planètes.

b.



2. a. Ce ne sont pas des trajectoires mais des lignes fictives qui ont uniquement une nécessité mathématique afin d'expliquer la trajectoire des planètes.

b. Il essaye d'expliquer le mouvement rétrograde de certaines planètes.

3. Les orbites étant circulaires, la vitesse des planètes dans ce modèle doit être constante.

4. La seule différence vient du fait que Kepler ne considère plus les orbites comme circulaires, mais elliptiques. Cela permet d'expliquer les variations de vitesse et d'intensité lumineuse.

› Synthèse

5. Le système solaire d'après Kepler est un système héliocentrique où les orbites sont des ellipses.

p. 319 ACTIVITÉ 2

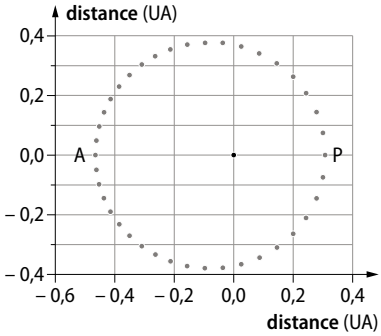
Orbite de Mercure

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Dans cette activité, on exploite l'outil numérique pour vérifier la première loi de Kepler. Cette activité utilise un programme Python qui génère les positions d'une planète à intervalles constants. Ce programme peut être modifié pour obtenir toutes les orbites des planètes possibles. Il permet également de tracer une trajectoire de comète, mais aussi d'exoplanète. Il faut connaître les paramètres des astres : période de révolution, excentricité et valeur du demi-grand axe. On peut aussi augmenter ou diminuer le nombre de positions sur l'orbite.

› Exploitation et analyse

1. a. On obtient la représentation suivante :



On observe que la position du Soleil n'est pas placée au centre de l'orbite. Il s'agit bien d'une ellipse. Le référentiel d'étude est le référentiel héliocentrique.

b. L'aphélie (point A sur la figure ci-dessus) se situe à une distance du Soleil de :

$0{,}464 \text{ U.A.} = 6{,}96 \times 10^7 \text{ km}$

Le périhélie (point P sur la figure ci-dessus) se situe à une distance du Soleil de :

$0{,}309 \text{ U.A.} = 4{,}64 \times 10^7 \text{ km}$

c. Dans le programme, on affiche $N = 40$ positions, soit une position tous les $\frac{0{,}240}{40} = 0{,}0060$ an, soit $0{,}006 \times 365{,}25 = 2{,}2$ jours. Il y a donc un point tous les 2,2 jours. En prenant le point avant et le point après, on détermine la vitesse aux points A et P.

Au périhélie :

$$v_P = \frac{(0{,}072 + 0{,}075) \times 150 \times 10^6}{2 \times 2{,}2 \times 24 \times 3\,600} = 58 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

À l'aphélie : $v_A = \frac{(0{,}048 \times 2) \times 150 \times 10^6}{2 \times 2{,}2 \times 24 \times 3\,600} = 38 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

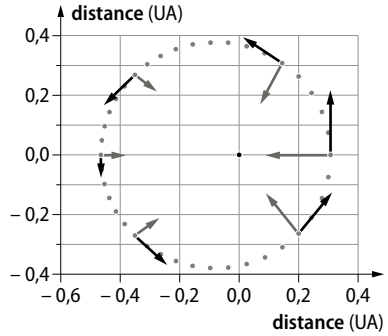
2. a. Plus l'orbite est proche d'un cercle, plus la valeur de e est proche de 0.

b. En utilisant le programme, on voit que les planètes Venus, Neptune et même la Terre ont des orbites proches d'un cercle. En effet, le Soleil est placé quasiment au centre de leurs orbites.

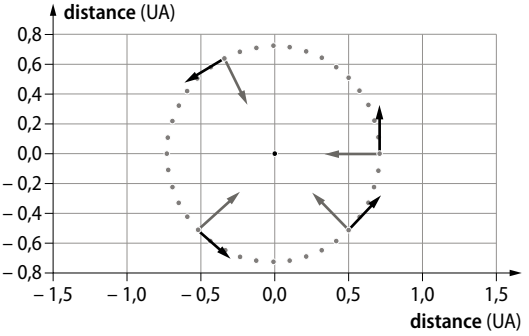
c. On note que les espaces entre les différentes positions à des intervalles de temps identiques sont les mêmes. La vitesse peut donc être considérée comme quasiment constante.

› Conclusion

3. Représentation de quelques vecteurs vitesse et accélération dans le cas de Mercure :



Représentation de quelques vecteurs vitesse et accélération dans le cas de Venus, qui a l'orbite la plus circulaire du système solaire :



p. 320 ACTIVITÉ 3

La comète de Halley

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

On utilise le programme de l'activité précédente et on ajoute une partie de code permettant le calcul d'une aire approchée. On vérifie ainsi la deuxième loi de Kepler. Cette loi est complexe à vérifier numériquement de façon précise : il est nécessaire d'appliquer certaines précautions. Il faut ainsi prendre un nombre de points important si l'orbite de l'astre est très elliptique.

› Exploitation et analyse

1. • Partie concernant le calcul de la longueur de chaque segment :

```
long1=m.sqrt((X[t1+i1])**2+(Y[t1+i1])**2)
long2=m.sqrt((X[t2+i1])**2+(Y[t2+i1])**2)
long3=m.sqrt((X[t2+i1]-
X[t1+i1])**2+(Y[t2+i1]-Y[t1+i1])**2)
```

• Partie concernant le calcul du demi-périmètre :

```
S_1=1/2*(long1+long2+long3)
```

• La formule de Héron est appliquée à la ligne de programme suivante :

```
AIRE1=m.sqrt(S_1*(S_1-long1)*(S_1-long2)*(S_1
-long3))+AIRE1
```

On notera que l'on additionne l'aire calculée par la méthode de Héron et l'aire précédemment calculée.

2. Dans l'ensemble des mesures présentées ci-après, les intervalles de temps ont été pris pour des positions identiques, entre les positions 0 et 5 pour l'aire entre t0 et t1, puis entre 50 et 55 pour l'aire entre t2 et t3.

L'unité des axes étant en UA, l'aire est donc en UA^2.

• Pour Mercure, en prenant 100 positions et deux intervalles de temps, on obtient :
Aire balayée entre t0 et t1 : 0,11155433605408169
Aire balayée entre t2 et t3 : 0,11401120231050339

• Pour Venus, dans les mêmes conditions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 0,40368477611327347
Aire balayée entre t2 et t3 : 0,403817028432449

• Pour la Terre, dans les mêmes conditions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 0,7717888982012697
Aire balayée entre t2 et t3 : 0,7730346099152757

• Pour Mars, dans les mêmes conditions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 1,7688090548920724
Aire balayée entre t2 et t3 : 1,783820599781274

• Pour Jupiter, dans les mêmes conditions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 20,813598293568564
Aire balayée entre t2 et t3 : 20,909093196386607

• Pour Saturne, dans les mêmes conditions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 70,0091389292504
Aire balayée entre t2 et t3 : 70,3711799264318

• Pour Uranus, dans les mêmes conditions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 283,8133754601152
Aire balayée entre t2 et t3 : 285,0605526305586

• Pour Neptune dans les mêmes conditions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 694,9179063309426
Aire balayée entre t2 et t3 : 695,5771493475195

On remarque que les aires balayées sont très proches pour des durées égales. La deuxième loi de Kepler est vérifiée.

3. a. La deuxième loi est compatible car, pour des temps identiques, les aires doivent être égales, ce qui signifie que la vitesse de la comète lorsqu'elle est proche du Soleil est beaucoup plus importante que lorsqu'elle est plus éloignée, car la comète doit alors parcourir une distance plus grande pour balayer une aire identique.

b. Lorsqu'on fait une simulation avec l'orbite de la comète de Halley, on trouve des valeurs qui sont très éloignées. La trajectoire étant fortement excentrée, certains points de l'orbite peuvent se trouver très éloignés les uns des autres, ce qui entraîne une grande erreur dans le calcul des aires :
Aire balayée entre t0 et t1 : 48,00336366634432
Aire balayée entre t2 et t3 : 63,47397027743303

Pour améliorer ce calcul numérique, on augmente le nombre de points.
• Pour 1 000 positions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 5,1611316934511775
Aire balayée entre t2 et t3 : 6,358432377655219
• Pour 10 000 positions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 0,6146560704821137
Aire balayée entre t2 et t3 : 0,6357920716484186
• Pour 100 000 positions :
Aire balayée entre t0 et t1 : 0,06358485010819409
Aire balayée entre t2 et t3 : 0,06359438487963717
On voit que le nombre de points permet d'améliorer les résultats.

› Conclusion

4. On voit que la deuxième loi de Kepler s'applique à toutes les planètes, et même à la comète de Halley, dès lors que où leur trajectoire est une orbite elliptique.

p. 321 **ACTIVITÉ 4**

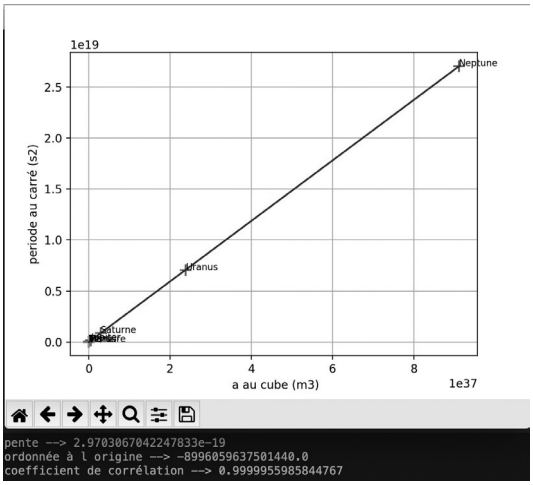
La masse de Jupiter

Commentaires pédagogiques

Cette activité propose de vérifier la troisième loi de Kepler à travers un programme Python pour le système solaire. Ce programme est adaptable à tous les types de systèmes satellitaires, mais aussi d'étoile avec exoplanètes, comme on cherche à le montrer à travers cette activité. Une partie « régression linéaire » permet de montrer la validité numérique du modèle.

› Questions préliminaires

1. On obtient le résultat suivant :



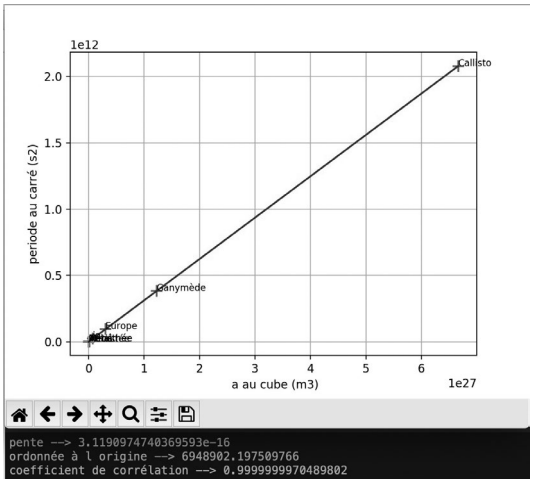
2. On s'aperçoit que T^2 est proportionnel à a^3.
$T^2 = 2{,}970 \times 10^{-19} \times a^3$. Le modèle est valide car le coefficient de corrélation est très proche de 1.

› Problème à résoudre

3. a. Voici la portion du programme à modifier :

```
LIST_a=[181,221,421,671,1070,1882]
LIST_T=[0.498,0.674,1.769,3.551,7.155,16.689]
LIST_P=['Amalthée','Thébé','Io','Europe','Ganymède','Callisto']
# a au cube et T au carré
for i in range(0, len(LIST_a)):
  LIST_a[i]=(LIST_a[i]*1e6)**3
  LIST_T[i]=(LIST_T[i]*24*3600)**2
```

Voici le graphe de T^2 en fonction de a^3 du système satellitaire de Jupiter :



On obtient donc $T^2 = 3{,}119 \times 10^{-16} \times a^3$, ce qui montre que la troisième loi de Kepler est vérifiée.

b. On a : $\dfrac{T^2}{a^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M} = \text{constante}$.

Donc $\dfrac{4\pi^2}{G \cdot M} = 3{,}119 \times 10^{-16}\ \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$

Ainsi $M = \dfrac{4\pi^2}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 3{,}119 \times 10^{-16}}$
$= 1{,}90 \times 10^{27}\ \text{kg}$

c. La masse trouvée est très proche la valeur indiquée dans le document 2.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel *p. 326*

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la trajectoire d'une planète n'est pas une ellipse dans le référentiel géocentrique.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la trajectoire d'une planète n'est pas une ellipse dans le référentiel terrestre.
La proposition C est une bonne réponse.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, d'après la première loi de Kepler, la planète est située à l'un des foyers de l'ellipse, donc pas au centre de celle-ci.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, d'après la première loi de Kepler, la planète est située à l'un des foyers de l'ellipse, donc pas sur l'orbite de la planète.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, d'après la troisième loi de Kepler, la période de révolution au carré est proportionnelle au cube du demi-grand axe, ce qui ne correspond pas à la relation donnée.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C peut être une bonne réponse.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la vitesse est constante sur une trajectoire circulaire.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car l'accélération n'est pas nulle, sa valeur est $a = \frac{v^2}{R}$.
La proposition C est une bonne réponse.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, d'après la deuxième loi de Kepler, les aires balayées sont égales, donc $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2 = \mathcal{A}_3$.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, d'après la deuxième loi de Kepler, les aires balayées sont égales donc $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2 = \mathcal{A}_3$.
La proposition C est une bonne réponse.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le vecteur vitesse n'est pas constant mais sa valeur l'est.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'accélération n'est pas nulle, sa valeur est $a = \frac{v^2}{R}$.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car l'expression de la vitesse sur une orbite circulaire est $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la période est de :
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \cdot M_T}} = 2\pi\sqrt{\frac{(6{,}4 \times 10^6 + 800 \times 10^3)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24}}}$$
$= 6\,083$ s
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la période est de 6 083 s.

9 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car elle ne correspond pas à la rotation de la Terre sur elle-même.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car elle ne correspond pas à la période de rotation de la Terre sur elle-même.

10 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car un satellite géostationnaire doit être synchrone mais aussi avoir une orbite sur le plan équatorial de la Terre.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le satellite doit avoir une altitude de 36 000 km afin que sa vitesse de rotation soit identique à celle de la Terre.

Acquérir les bases *p. 327*

› 1. Mouvement des satellites, des planètes et lois de Kepler

11 **1.** Un référentiel planétocentrique est un référentiel qui a pour origine le centre de la planète. Un repère lui est associé visant des étoiles très lointaines, qui peuvent ainsi être considérées comme fixes.

2. 1re loi de Kepler : dans le référentiel planétocentrique, l'orbite d'un satellite est une ellipse et le centre de la planète occupe un des deux foyers.
2e loi de Kepler ou loi des aires : le segment reliant la planète au satellite balaye des aires égales pendant des durées égales.
3e loi de Kepler ou loi des périodes : la période de révolution T au carré est proportionnelle au cube du demi-grand axe a.

3. a. On peut en déduire que la valeur de la vitesse est constante.
b. La période de révolution T au carré est proportionnelle au cube du rayon du cercle :
$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$$

12 **1.** Il s'agit d'un référentiel jovien, ou jupitérocentrique, ou encore le centre de Jupiter associé à un repère orienté vers des étoiles lointaines.

2. On voit sur la représentation que Jupiter n'est pas au centre de l'orbite de Thémisto.

3. D'après la première loi de Kepler, l'orbite est une ellipse et Jupiter est placée à l'un des foyers de l'ellipse.

4. On a $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2$, les temps de parcours des arcs de cercle sont identiques. En effet, il y a le même nombre de points. D'après la deuxième loi de Kepler, le segment reliant la planète au satellite balaye des aires égales pendant des durées égales.

5. D'après la deuxième loi de Kepler, les aires sont égales. Pour que les aires soient égales, comme la distance entre Jupiter et Thémisto est plus importante dans le cas de $\mathscr{A}_1$ que dans le cas de $\mathscr{A}_2$, il faut que la distance parcourue soit plus importante dans le cas de $\mathscr{A}_2$ que dans le cas de $\mathscr{A}_1$. Si la distance parcourue est plus importante pour $\mathscr{A}_2$ que pour $\mathscr{A}_1$, pour un même temps de parcours, alors la vitesse de Thémisto est plus importante pour $\mathscr{A}_2$ que pour $\mathscr{A}_1$.

6. L'écartement entre les points est plus important pour $\mathscr{A}_2$ que pour $\mathscr{A}_1$. La vitesse de Thémisto est donc plus importante lors du parcours de $\mathscr{A}_2$ que pour $\mathscr{A}_1$.

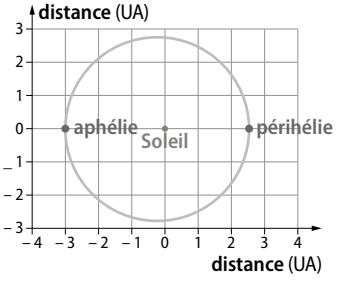
13 **1.** On remarque que la distance Mars-Soleil n'est pas constante. Cela signifie que la trajectoire n'est pas circulaire mais elliptique, comme le montre la 1re loi de Kepler.

2. D'après la 1re loi de Kepler, le Soleil est placé à l'un des foyers de l'orbite elliptique.

3. La vitesse est maximale lorsque Mars est au plus proche du Soleil et minimale au plus loin.

14 **1.** On remarque que la distance Cérès-Soleil n'est pas constante. Cela signifie que la trajectoire n'est pas circulaire, mais qu'il s'agit d'une ellipse, comme le montre la première loi de Kepler.

2.



3. On a :

$2a_c = 4{,}47 \times 10^8 + 3{,}81 \times 10^8 = 8{,}28 \times 10^8$ km

Soit $a_c = \dfrac{8{,}28 \times 10^8}{2} = 4{,}14 \times 10^8$ km

4. En utilisant la troisième loi de Kepler, on trouve :

$\dfrac{T_C^2}{a_C^3} = \dfrac{T_T^2}{a_T^3}$

Donc : $T_C = \sqrt{\dfrac{a_C^3}{a_T^3}} \times T_T = \sqrt{\dfrac{(4{,}14 \times 10^8)^3}{(1{,}50 \times 10^8)^3}} \times 365{,}25$

$= 1{,}67 \times 10^3$ jours

15 *Une erreur s'est glissée dans l'énoncé : le rayon de l'orbite de Thétys est de 0,295 Gm.*

1. La période de révolution T au carré est proportionnelle au cube du rayon R.

2. En traçant le graphe de $T^2 = f(R^3)$, on trouve :

$T^2 = 1{,}04 \times 10^{-15} \times R^3$

3. $T = \sqrt{1{,}04 \times 10^{-15} \times R^3}$

$= \sqrt{1{,}04 \times 10^{-15} \times (0{,}238 \times 10^9)^3}$

$= 1{,}18 \times 10^5$ s $= 1{,}37$ jour

16 $\dfrac{T^2}{a^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_J}$, donc $M_J = \dfrac{4\pi^2 \cdot a^3}{G \cdot T^2}$

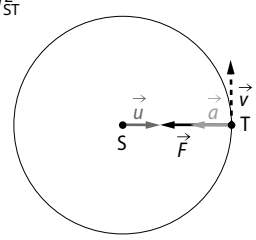
$M_J = \dfrac{4\pi^2 \times (1{,}07 \times 10^9)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times (7{,}15 \times 24 \times 3\,600)^2}$

$= 1{,}90 \times 10^{27}$ kg

› 2. Cas des mouvements circulaires

17 **1.** Il s'agit du référentiel géocentrique.

2. $\vec{F} = -G\dfrac{M_S \cdot M_T}{d_{ST}^2}\vec{u}$



3. D'après la deuxième loi de Newton, on a :

$M_T \cdot \vec{a} = \vec{F} = G\dfrac{M_S \cdot M_T}{d_{ST}^2}\vec{n}$

Or l'accélération dans le repère de Frenet s'écrit :

$\vec{a} = \dfrac{dv}{dt}\vec{\tau} + \dfrac{v^2}{d_{ST}}\vec{n}$, donc la relation précédente devient :

$M_T \dfrac{dv}{dt}\vec{\tau} + M_T \dfrac{v^2}{d_{ST}}\vec{n} = G\dfrac{M_S \cdot M_T}{d_{ST}^2}\vec{n}$

Ainsi, en effectuant la projection sur $\vec{\tau}$, on obtient :

$M_T \cdot \dfrac{dv}{dt} = 0$, donc $\dfrac{dv}{dt} = 0$.

La vitesse est donc constante, le mouvement de la Terre est uniforme.

4. En projetant sur $\vec{n}$, on obtient :

$M_T \cdot \dfrac{v^2}{d_{ST}} = \dfrac{M_S \cdot M_T}{d_{ST}^2}$. En simplifiant, on trouve :

$v^2 = G\dfrac{M_S}{d_{ST}}$ soit $v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_S}{d_{ST}}}$.

$v = \sqrt{\dfrac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 1{,}99 \times 10^{30}}{149{,}6 \times 10^9}}$

$= 2{,}98 \times 10^4$ m · s^{-1}

5. On a $v = \dfrac{2\pi \cdot d_{ST}}{T_T}$. En remplaçant la vitesse par la relation précédente, on obtient :

$T_T = 2\pi\sqrt{\dfrac{{d_{ST}}^3}{G \cdot M_S}}$ soit :

$T_T = 2\pi\sqrt{\dfrac{(149{,}6\times10^9)^3}{6{,}67\times10^{-11}\times1{,}99\times10^{30}}}$

$= 3{,}16\times10^7\,\text{s} = 365$ jours

18 **1.** Le référentiel géocentrique.

2. On considère que la seule force appliquée au satellite est la force d'attraction exercée par la Terre sur celui-ci. Ainsi, d'après la deuxième loi de Newton on a :

$m_S \cdot \vec{a} = \vec{F} = G\dfrac{M_T \cdot m_S}{(R_T + h)^2}\vec{n}$

Or l'accélération dans le repère de Frenet s'écrit $\vec{a} = \dfrac{v^2}{R_T + h} \cdot \vec{n}$, donc la relation précédente devient :

$m_S \cdot \dfrac{v^2}{R_T + h} \cdot \vec{n} = G\dfrac{M_T \cdot m_S}{(R_T + h)^2}\vec{n}$

En projetant sur $\vec{n}$, on obtient :

$m_S \cdot \dfrac{v^2}{R_T + h} = G\dfrac{M_T \cdot m_S}{(R_T + h)^2}$.

En simplifiant les différents termes, on trouve :

$v^2 = G\dfrac{M_T}{R_T + h}$ soit $v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_T}{R_T + h}}$.

3. a. On a $v = \dfrac{2\pi(R_T + h)}{T}$. En remplaçant la vitesse par la relation précédente, on obtient :

$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{(R_T + h)^3}{G \cdot M_T}}$

b. $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{(6{,}37\times10^6 + 1{,}38\times10^7)^3}{6{,}67\times10^{-11}\times6{,}0\times10^{24}}}$

$= 2{,}8\times10^4\ \text{s} = 7{,}9\ \text{h}$

c. Les satellites font un peu plus de trois tours de la Terre.

19 **1.** Il s'agit du référentiel héliocentrique.

2. On a : $v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_S}{r}}$ et, pour une révolution, on a : $v = \dfrac{2\pi r}{T}$.

Donc $\left(\dfrac{2\pi r}{T}\right)^2 = \dfrac{G \cdot M_S}{r}$, d'où $\dfrac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \dfrac{G \cdot M_S}{r}$.

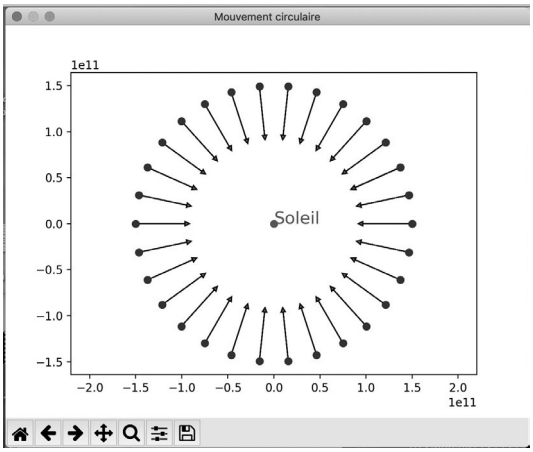
Ainsi : $\dfrac{T^2}{r^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_S}$.

3. On peut montrer que :

$\dfrac{T^2}{r^3}$ = constante = $2{,}95\times10^{-19}\ \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

Planète	a (m)	T (s)	$\dfrac{T^2}{r^3}$ ($\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)
Mercure	$5{,}81\times10^{10}$	7 573 824	$2{,}93\times10^{-19}$
Vénus	$1{,}08\times10^{11}$	19 407 924	$2{,}95\times10^{-19}$
Terre	$1{,}50\times10^{11}$	31 557 600	$2{,}95\times10^{-19}$
Mars	$2{,}28\times10^{11}$	59 328 288	$2{,}97\times10^{-19}$
Jupiter	$7{,}80\times10^{11}$	375 535 440	$2{,}97\times10^{-19}$
Saturne	$1{,}42\times10^{12}$	927 793 440	$2{,}97\times10^{-19}$
Uranus	$2{,}88\times10^{11}$	2 650 838 400	$2{,}94\times10^{-19}$
Neptune	$4{,}50\times10^{12}$	5 207 004 000	$2{,}98\times10^{-19}$

20 **1.** En utilisant le programme, on trace les différentes positions de la planète et la représentation vectorielle de l'accélération est donnée.



2. On obtient cette représentation dans le référentiel héliocentrique.

3. L'accélération est radiale (de direction le rayon du cercle), centripète (dirigée vers le centre du Soleil) et de valeur constante (le vecteur a une longueur identique).

4. a. D'après la deuxième loi de Newton, on a :

$M_T \cdot \vec{a} = \vec{F} = G\dfrac{M_S \cdot M_T}{r^2}\vec{n}$, donc :

$\vec{a} = G\dfrac{M_S}{r^2}\vec{n}$, où $\vec{n}$ est le vecteur de Frenet lié à la Terre en mouvement.

b. Le terme $G\dfrac{M_S}{r^2}$ est constant, ce qui confirme que la valeur de l'accélération est constante. Le vecteur

accélération $\vec{a}$ ne dépend que de $\vec{n}$ et ce vecteur unitaire est dirigé vers le centre du Soleil. Cela confirme que le vecteur accélération $\vec{a}$ est radial et centripète, ce qui est compatible avec la simulation.

› 3. Les satellites géostationnaires

21 **1.** $T = 86\,164$ s pour un satellite géosynchrone et la période de rotation de la Terre sur elle-même est de 23 h 56 min 4 s = $23 \times 3\,600 + 56 \times 60 + 4 = 86\,164$ s. Ces deux périodes sont égales.

2. En utilisant la relation $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{(R_T + h)^3}{G \cdot M_T}}$, on obtient :

$$h = \left(\frac{G \cdot M_T \cdot T^2}{4\pi^2}\right)^{\frac{1}{3}} - R_T$$

$$= \left(\frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 6{,}0 \times 10^{24} \times 86\,164^2}{4\pi^2}\right)^{\frac{1}{3}} - 6\,370 \times 10^3$$

$$= 3{,}6 \times 10^8 \text{ m}$$

3. a. La figure 2 est incompatible avec la 1re loi de Kepler car le centre de la Terre doit être, dans le cas d'une orbite circulaire, au centre de cette orbite, ce qui n'est pas le cas ici. De plus, la force gravitationnelle est dirigée vers le centre de la Terre alors que l'accélération est dirigée d'après l'orbite vers le centre du cercle, ce qui est incompatible avec la deuxième loi de Newton appliquée au satellite.
b. Dans les deux autres cas, les satellites peuvent être géosynchrones car leur trajectoire est circulaire.

4. a. Il s'agit du plan équatorial.
b. Il a le même sens de rotation que la rotation propre de la Terre.
c. C'est la figure 1.

22 **1.** Ces trajectoires sont représentées dans le référentiel terrestre, puisque la carte n'est pas en mouvement.

2. On obtiendrait un point.

Faire le point avant d'aller plus loin p. 329

◗ ***Citer la première loi de Kepler et expliquer ce qu'elle implique sur la nature de l'orbite d'un astre.***
Dans le référentiel héliocentrique, l'orbite d'une planète est une ellipse et le centre du Soleil occupe un des deux foyers. La nature de l'orbite est elliptique.

◗ ***Montrer en utilisant la 2e loi de Kepler que la vitesse d'un astre est uniforme sur une orbite circulaire.***
La deuxième loi de Kepler énonce que le segment reliant le Soleil à la planète balaye des aires égales pendant des durées égales. Ainsi, selon cette loi, les aires balayées sont identiques pendant des durées égales, donc les arcs de cercle parcourus sont égaux, donc la vitesse est constante sur l'ensemble de l'orbite circulaire.

◗ ***Montrer que l'accélération d'un objet spatial en mouvement circulaire autour d'un astre attracteur est radiale et centripète.***
L'expression de la force gravitationnelle est $\vec{F} = -G\dfrac{m \cdot M}{r^2}\vec{u}_r = G\dfrac{m \cdot M}{r^2}\vec{n}$ sur une trajectoire circulaire, où $\vec{n}$ est le vecteur élémentaire lié au repère de Frenet sur l'objet spatial en mouvement.
D'après la deuxième loi de Newton, on a : $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$.
Ainsi : $\vec{a} = G\dfrac{M}{r^2}\vec{n} = -G\dfrac{M}{r^2}\vec{u}_r$
L'expression montre que l'accélération est centripète et radiale, comme le montre l'orientation des vecteurs unitaires $\vec{n}$ et $\vec{u}_r$.

◗ ***Sur quel plan doit se placer un satellite géostationnaire ?***
Un satellite géostationnaire doit être placé sur le plan équatorial de la Terre afin de posséder le même axe de rotation que la Terre.

◗ ***Deux satellites possèdent des orbites circulaires autour de la même planète. Le premier est éloigné de $1{,}0 \times 10^3$ km du centre de sa planète avec 15 jours comme période de révolution. Si le second satellite a une période de révolution de 24 jours, quelle est la distance qui le sépare du centre de la planète ?***
D'après la troisième loi de Kepler, on peut écrire que : $\dfrac{T_1^2}{R_1^3} = \dfrac{T_2^2}{R_2^3}$.
On obtient donc : $R_2^3 = \dfrac{T_2^2}{T_1^2} \cdot R_1^3$.
D'où :

$$R_2 = \left(\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot R_1 = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot R_1 = \left(\frac{24}{15}\right)^{\frac{2}{3}} \times 1{,}0 \times 10^3$$

$$= 1{,}4 \times 10^3 \text{ km}$$

◗ ***Énoncer la troisième loi de Kepler. Peut-elle être utilisée pour décrire l'orbite d'un satellite autour d'une planète ?***
La période de révolution T au carré est proportionnelle au cube du demi-grand axe a.
$T^2 = k \cdot a^3$
La troisième loi de Kepler peut permettre de connaître la période de révolution et la valeur du demi-grand axe de l'orbite du satellite.

◗ ***Qu'est-ce qu'un satellite géostationnaire ?***
Un satellite géostationnaire possède la particularité d'être toujours positionné au-dessus du même point de la surface de la Terre.

◗ *Retrouver l'expression de la vitesse $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$ pour un objet spatial en mouvement circulaire et uniforme autour d'un astre attracteur.*

Soit M la masse d'un astre attracteur et un objet spatial de masse m en mouvement circulaire et uniforme autour de cet astre. L'expression de la force gravitationnelle appliquée au satellite s'écrit : $\vec{F} = G\frac{M \cdot m}{r^2}\vec{n}$, où $\vec{n}$ est le vecteur élémentaire lié au repère de Frenet sur l'objet spatial en mouvement.

L'accélération dans le repère de Frenet s'écrit : $\vec{a} = \frac{v^2}{r}\vec{n}$, donc la relation précédente devient $m\frac{v^2}{r}\vec{n} = G\frac{M \cdot m}{r^2}\vec{n}$.

L'expression devient : $m\frac{v^2}{r} = G\frac{M \cdot m}{r^2}$ puis, en simplifiant, on obtient : $v^2 = G\frac{M}{r}$, donc :

$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$

Exercices similaires aux exercices résolus

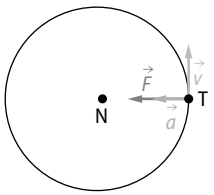
p. 330 et 331

24 *Les données suivantes sont manquantes dans le spécimen du professeur.*
Masse de Neptune : $M_N = 1{,}02 \times 10^{26}$ kg ; rayon de l'orbite de Triton : $R_{NT} = 3{,}55 \times 10^5$ km ; constante gravitationnelle : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ m³ · kg⁻¹ · s⁻².
Elles figurent dans le manuel élève ainsi que dans les manuels numériques.

1. Il s'agit du référentiel neptunocentrique.

2. D'après la deuxième loi de Kepler (ou loi des aires), les aires balayées pendant une même durée sont égales. Pour une trajectoire circulaire, les aires balayées pendant une même durée correspondent aux mêmes arcs de cercles parcourus, donc à la même distance parcourue sur l'orbite pour des temps identiques. Cela montre que la valeur de la vitesse est constante puisque la distance parcourue est identique pour des temps égaux.

3.



4. a. $\frac{T^2}{{R_{NT}}^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_N}$ donc $T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_N} \cdot {R_{NT}}^3$

Ainsi :

$T^2 = 2\pi\sqrt{\frac{{R_{NT}}^3}{G \cdot M_N}} = 2\pi\sqrt{\frac{(3{,}55 \times 10^8)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 1{,}02 \times 10^{26}}}$

$= 5{,}1 \times 10^5$ s $= 5{,}9$ jours

b. On a :

$v = \frac{2\pi R_{NT}}{T} = \frac{2\pi \times 3{,}55 \times 10^8}{5{,}1 \times 10^5}$

$= 4{,}4 \times 10^3$ m · s^{-1} $= 4{,}4$ km · s^{-1}

26 **1.** Hale-Bopp décrit une orbite dans le référentiel héliocentrique.

2. La perturbation engendrée par Jupiter est due à la force gravitationnelle que la planète peut exercer sur les astres à sa proximité. La comète a probablement dû passer près de Jupiter, qui a perturbé son orbite initiale.

3. On a : $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_S}$, donc $T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_S}a^3$.

Ainsi : $T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{G \cdot M_S}} = 2\pi\sqrt{\frac{(186 \times 150 \times 10^9)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 2{,}0 \times 10^{30}}}$

$= 8{,}0 \times 10^{10}$ s $= 2{,}5 \times 10^3$ ans

Remarque : On estime ainsi le prochain passage en $1997 + 2{,}5 \times 10^3 = 4{,}5 \times 10^3$ ans.
Ainsi, Hale-Bopp devrait revenir au périhélie du Soleil vers l'an 4 500.

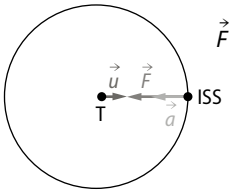
S'entraîner pour maîtriser

p. 332

27 **1.** Le référentiel est géocentrique ou référentiel lié au centre de la Terre et lié à un axe visant trois étoiles lointaines.

2. On a : $d = R + h = 430 + 6{,}37 \times 10^3 = 6{,}80 \times 10^3$ km.

3.



$\vec{F} = -G\frac{m \cdot M}{(R+h)^2}\vec{u}$

4. L'accélération dans le repère de Frenet s'écrit dans le cas général : $\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} + \frac{v^2}{R+h}\vec{n}$

Comme le mouvement est circulaire, il est aussi uniforme donc : $\frac{dv}{dt} = 0$.

Ainsi : $\vec{a} = \frac{v^2}{R+h}\vec{n}$

5. D'après la deuxième loi de Newton, on a :
$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$

Donc : $m\frac{v^2}{R+h}\vec{n} = G\frac{M \cdot m}{(R+h)^2}\vec{n}$.

En effectuant la projection, on trouve que $m\frac{v^2}{R+h} = G\frac{M \cdot m}{(R+h)^2}$.

En simplifiant les différents termes, on obtient :

$v^2 = G\frac{M}{R+h}$ soit $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R+h}}$

$v = \sqrt{\frac{6{,}67\times10^{-11}\times5{,}98\times10^{24}}{6{,}37\times10^{6}+430\times10^{3}}} = 7{,}66\times10^{3}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

6. On a $v = \frac{2\pi(R+h)}{T}$. En remplaçant la vitesse par la relation précédente, on obtient :

$T = 2\pi\sqrt{\frac{(R+h)^3}{G \cdot M}}$ soit

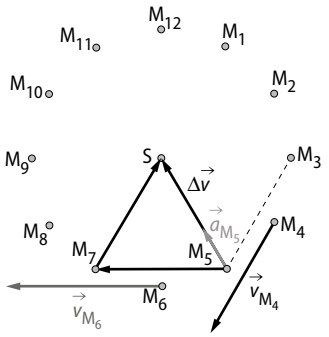
$T = 2\pi\sqrt{\frac{(6{,}37\times10^{6}+430\times10^{3})^3}{6{,}67\times10^{-11}\times5{,}98\times10^{24}}} = 5{,}58\times10^{3}\ \text{s}$

Soit $T = 1{,}55$ heure = 1 h 33 min.

28 **1.** Dans le référentiel géocentrique.

2. Visiblement, il est circulaire et uniforme.

3.



4. SM = 1,7 cm, qui correspond à 150 millions de km.

$M_3M_5 = M_5M_7 = 1{,}7$ cm, soit 150 millions de km.

D'où :

$v_{M_4} = v_{M_6} = \frac{M_3M_5}{2 \cdot \Delta t} = \frac{150\times10^{9}}{2\times30{,}4\times24\times3\,600}$

$= 29\times10^{3}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Le vecteurs sont tracés sur le schéma ci-dessus.

5. a. Graphiquement, on mesure une valeur de $\Delta\vec{v}$ égale à $29\times10^{3}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, soit une accélération :

$a_{M_5} = \frac{\Delta v}{2\Delta t} = \frac{29\times10^{3}}{2\times30{,}4\times24\times3\,600}$

$= 5{,}5\times10^{-3}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

Le vecteur est tracé ci-dessus.

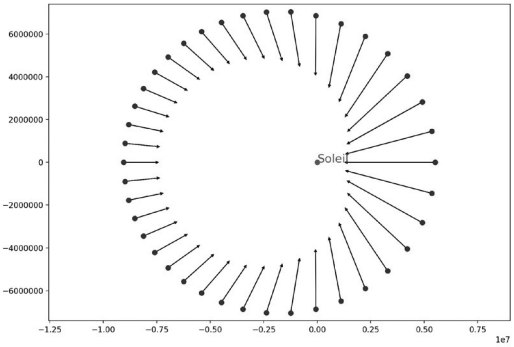
b. On remarque que l'accélération est radiale et centripète.

6. a. $\frac{v^2}{a} = \frac{(29\times10^{3})^2}{5{,}5\times10^{-3}} = 1{,}5\times10^{11}\ \text{m}$

b. Cela correspond à la distance Terre-Soleil, rayon de l'orbite circulaire.

c. $\vec{a} = \frac{v^2}{R}\vec{u}_n$, où $R = 1{,}5\times10^{11}$ m.

29 **1.**



2. Le référentiel héliocentrique.

3. Les temps entre les points sont constants, donc la vitesse augmente lorsque Mercure est au plus proche du Soleil, car l'écartement entre les points augmente. Inversement, elle diminue lorsque la planète s'éloigne du Soleil.

4. Le vecteur accélération n'est pas de valeur constante, mais il est toujours dirigé vers le Soleil. Pour Mercure, de masse m et d'accélération $\vec{a}$, la deuxième loi de Newton s'écrit :

$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_{S/M}$ où $\vec{F}_{S/M}$ est la force gravitationnelle exercée par le Soleil sur Mercure. Cette force est orientée de Mercure vers le Soleil. Ainsi, l'accélération a même sens et direction que cette force.

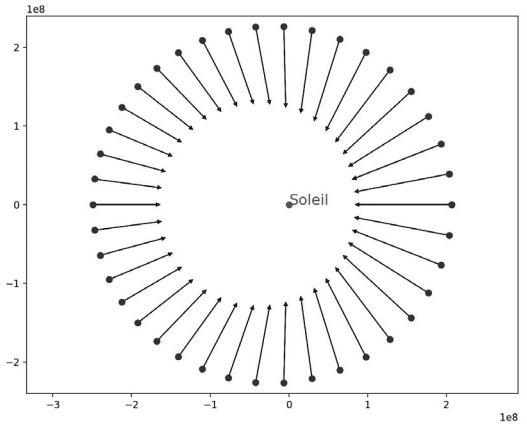
La représentation est donc bien compatible avec la deuxième loi de Newton.

5. D'après la deuxième loi de Kepler, pour que l'aire balayée par le segment reliant le Soleil et la planète soit constante, il faut nécessairement que la vitesse augmente lorsque la distance entre la planète et le Soleil diminue, ce qui est bien en accord avec les résultats de la simulation.

6. On peut prendre Mars comme exemple car, après Mercure, c'est la planète du système solaire qui possède l'excentricité la plus élevée. Pour visualiser les vecteurs, il faut modifier les facteurs d'échelles comme indiqué ci-dessous.

```
plt.arrow(X(i+2),Y(i+2),4e-2*AX[i],4e2*AY[i],head_width=4e6,head_length=4e6,length_includes_head=True)
```

On obtient le résultat ci-après.



La simulation de l'orbite de Mars montre bien des variations identiques et confirme l'orientation des vecteurs accélération.

30 ***Quelle est cette planète ?***

Un satellite (S) orbite autour d'une planète (P) dans un mouvement circulaire uniforme.

Données : *Rayon orbital de (S) : $r_S = 6{,}7 \times 105$ km.*
Période de révolution de (S) : 3 j 13 h 14 min.

1. *Que devient la troisième loi de Kepler dans le cas de ce satellite en mouvement circulaire uniforme ?*

2. *Calculer la période de révolution du satellite (S) en seconde.*

3. a. *Exprimer puis calculer la masse M_P de la planète (P).*

b. *En déduire l'identité de la planète (P).*

1. La troisième loi de Kepler s'écrit $\frac{T^2}{a^3} = \text{k}$, où a est le demi-grand axe de l'ellipse. Si le mouvement est circulaire, l'orbite est donc un cercle de rayon r_S.

Ainsi la relation s'écrit $\frac{T^2}{{r_S}^3} = \text{k}$.

2. 3 j 13 h 14 min $= 3 \times 24 \times 3\,600 + 13 \times 3\,600 + 14 \times 60 = 306\,840$ s

3. a. $\frac{T^2}{r_S^3} = \frac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M_P}$

Donc

$$M_P = \frac{4\pi^2 {r_S}^3}{\text{G} \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \times (6{,}7 \times 10^8)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 306\,840^2} = 1{,}9 \times 10^{27} \text{ kg}$$

b. Il s'agit de Jupiter.

31 **1.** On trouve :

$$\text{k} = \frac{T^2}{a^3} = \frac{1{,}5 \times 10^{19}}{0{,}5 \times 10^{38}} = 3 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3},$$

donc $T^2 = 3 \times 10^{-19} \times a^3$

2. $2a = 4{,}08 \times 10^8 + 4{,}48 \times 10^8 = 8{,}56 \times 10^8$ m

Donc $a = \frac{8{,}56 \times 10^8}{2} = 4{,}28 \times 10^8$ m.

3. Comme $T^2 = \text{k} \cdot a^3$:

$$T = \sqrt{3 \times 10^{-19} \times (4{,}28 \times 10^{11})^3} = 1{,}5 \times 10^8 \text{ s} = 4{,}9 \text{ ans}$$

4. a. Il s'agit d'un référentiel idacentrique.

b. D'après la première loi de Kepler appliquée à l'astéroïde Ida et son satellite, les orbites sont elliptiques.

c. Ida est placé à l'un des foyers, d'après la 1re loi de Kepler.

d. $\frac{T^2}{a_I^3} = \frac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M_I}$ donc $M_I = \frac{4\pi^2 \cdot a_I^3}{\text{G} \cdot T^2}$

$$M_I = \frac{4\pi^2 \times (108 \times 10^3)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times (1{,}54 \times 24 \times 3\,600)^2} = 4{,}21 \times 10^{16} \text{ kg}$$

32 **1.** Le référentiel est le centre de la naine rouge Gliese 581, lié à un repère dont les axes sont dirigés vers des étoiles fixes.

2. $M_{\text{étoile}} = \frac{4\pi^2 \cdot a^3}{\text{G} \cdot T^2}$

$$= \frac{4\pi^2 \times (7{,}2993 \times 10^{-2} \times 1{,}5 \times 10^{11})^3}{6{,}67408 \times 10^{-11} \times (12{,}9191 \times 24 \times 3\,600)^2} = 6{,}231516 \times 10^{29} \text{ kg}$$

3. $u(M) = M \cdot \sqrt{\left(\frac{u(\text{G})}{\text{G}}\right)^2 + \left(3 \times \frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(2 \times \frac{u(T)}{T}\right)^2}$

$$u(M) = 6{,}231516 \times 10^{29} \times \sqrt{\left(\frac{0{,}00031}{6{,}67408}\right)^2 + \left(3 \times \frac{2{,}2 \times 10^{-5}}{7{,}2993 \times 10^{-2}}\right)^2 + \left(2 \times \frac{5{,}8 \times 10^{-3}}{12{,}9191}\right)^2}$$

$u(M) = 7{,}9 \times 10^{26}$ kg $= 0{,}0079 \times 10^{29}$ kg

$M_{\text{étoile}} = 6{,}2315 \times 10^{29} \pm 0{,}0079 \times 10^{29}$ kg

L'intervalle de confiance est donc :

$6{,}2236 \times 10^{29}$ kg $< M_{\text{étoile}} < 6{,}2304 \times 10^{29}$ kg

4. $M_{\text{ref}} = 0{,}31 \times 1{,}989 \times 10^{30}$ kg

$= 0{,}617 \times 10^{30}$ kg

$$\frac{|M_{\text{mes}} - M_{\text{ref}}|}{u(M)} = \frac{|6{,}2315 \times 10^{29} - 6{,}17 \times 10^{29}|}{7{,}9 \times 10^{26}} = 7{,}78$$

L'écart est supérieur à l'incertitude-type.

33 **1.** C'est le référentiel tchouricentrique.

2. En utilisant la troisième loi de Kepler, on a : $\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M_c}$

Soit $T^2 = \frac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M_c} R^3$ donc :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{\text{G} \cdot M_c}} = 2\pi\sqrt{\frac{((10 + 2{,}5) \times 10^3)^3}{6{,}67408 \times 10^{-11} \times 1{,}0 \times 10^{13}}} = 3{,}4 \times 10^5 \text{ s} = 94 \text{ h}$$

3. $\vec{F} = -G\frac{m_s \cdot M_c}{R^2}\vec{u}_r$ où $\vec{u}_r$ est le vecteur unitaire dirigé de Tchouri vers Rosetta.

4. $\vec{F} = -G\frac{m_s \cdot M_c}{R^2}\vec{u}_r = m_s \cdot \vec{\mathcal{G}}$, où $\vec{\mathcal{G}}$ est le champ de gravitation engendré par l'astéroïde Tchouri, d'où :

$\vec{\mathcal{G}} = -G\frac{M_c}{R^2}\vec{u}_r$

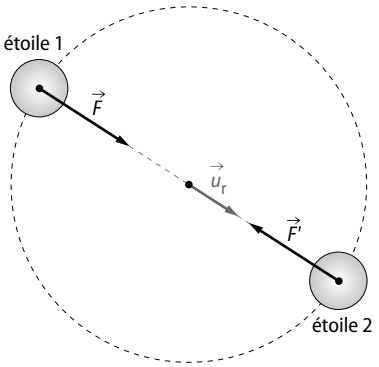
Remarque : $\mathcal{G} = G\frac{M_c}{R^2} = 6{,}67\times10^{-11}\times\frac{1{,}0\times10^{13}}{(2{,}5\times10^3)^2} = 1{,}1\times10^{-4}$ m · s^{-1}

$\mathcal{G}$ est largement inférieur à g :

$\frac{g}{\mathcal{G}} = \frac{9{,}8}{1{,}1\times10^{-4}} = 8{,}9\times10^4$.

Le champ terrestre est près de 90 000 fois plus intense.

34 **1.**



$\vec{F} = -\vec{F'} = G\frac{m \cdot m}{(2r)^2}\vec{u}_r = G\frac{m^2}{(2r)^2}\vec{u}_r$

2. a. D'après la deuxième loi de Newton appliquée à l'étoile 1, on a :

$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ donc $G\frac{m^2}{(2r)^2}\vec{u}_r = m\frac{v^2}{r}\vec{u}_r$

En projetant sur $\vec{u}_r$: $G\frac{m}{4r^2} = \frac{v^2}{r}$

D'où $v^2 = G\frac{m}{4r}$ et, ainsi, $v = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{G\cdot m}{r}}$.

b. $v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{G\cdot m}{r}}$, donc :

$r^3 = \frac{G\cdot m}{16\pi^2}\cdot T^2$

35 **Exemple d'exposé oral**

La simulation représente la mise en **orbite géostationnaire** d'un satellite. Le satellite est dans un premier temps installé sur une **orbite** basse **circulaire** située à 200 km d'altitude de la surface de la Terre. Sur cette orbite, le satellite est en mouvement circulaire et uniforme et soumis à une **force gravitationnelle** importante.

Une poussée moteur est alors donnée, ce qui fait changer d'orbite le satellite, qui passe sur **orbite elliptique** dont l'apogée est situé à 36 000 km d'altitude. Il s'agit d'une **orbite de transition**. On remarque, comme l'indique la première **loi de Kepler**, que la Terre est placée à l'un des foyers de l'ellipse. Contrairement à une orbite circulaire, les valeurs des **vecteurs vitesse** et **accélération** ne sont pas constantes sur une trajectoire elliptique.

Une fois le satellite arrivé à l'apogée de la trajectoire à 36 000 km, une **poussée moteur** engendre une mise sur orbite géostationnaire.

36 **Exemple d'exposé oral**

On suppose que la Lune a une orbite circulaire de rayon R.

La troisième loi de Kepler s'écrit : $\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{G\cdot M_T}$, on en déduit que :

$R = \left(\frac{G\cdot M_T}{4\pi^2}T^2\right)^{\frac{1}{3}}$

$= \left(\frac{6{,}67\times10^{-11}\times6{,}0\times10^{24}}{4\pi^2}\times(27\times24\times3\,600)^2\right)^{\frac{1}{3}}$

$= 3{,}8\times10^8$ m

En considérant que la Lune n'est soumise qu'à l'action mécanique exercée par la Terre, d'après la deuxième loi de Newton, la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre est telle que :

$\vec{F} = M_L \cdot \vec{a} = G\frac{M_L \cdot M_T}{R^2}\vec{n}$

D'où, en projetant sur $\vec{n}$, $a = G\cdot\frac{M_T}{R^2}$

$a = \frac{6{,}67\times10^{-11}\times6{,}0\times10^{24}}{(3{,}8\times10^8)^2} = 2{,}8\times10^{-3}$ m · s^{-2}

Dans le repère de Frenet, comme le mouvement est circulaire uniforme :

$\vec{a} = \frac{v^2}{R}\vec{n}$. D'où, en projetant sur $\vec{n}$, $a = \frac{v^2}{R}$.

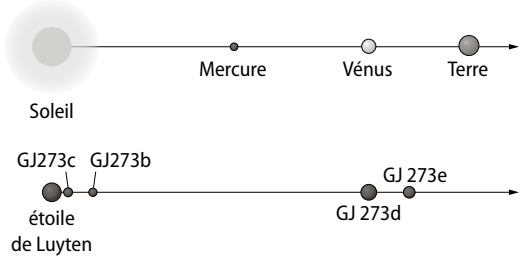
D'où $v = \sqrt{a\cdot R}$

$v = \sqrt{2{,}8\times10^{-3}\times3{,}8\times10^8} = 1{,}1\times10^3$ m · s^{-1}

Développer ses compétences *p. 335*

37 **› Analyse**

1.

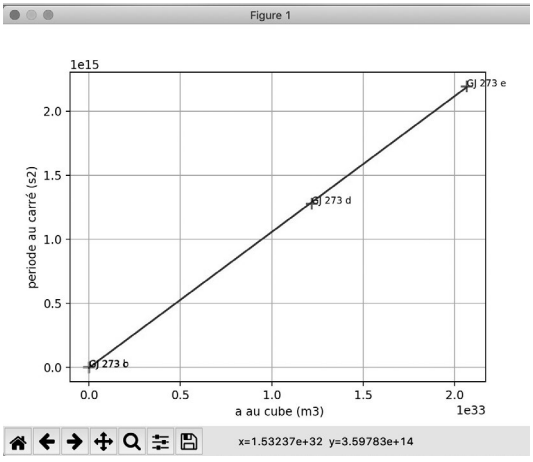


2. a. L'orbite circulaire implique que l'exoplanète est à une distance constante de son étoile. Il n'y a donc pas de variation de luminosité. À l'inverse, si une exoplanète est sur une orbite elliptique, les variations de luminosité dépendent de la distance à l'étoile : plus elle est loin, moins elle est soumise à la lumière de l'astre.
b. GJ 273 e est l'exoplanète dont l'excentricité est la plus faible, son orbite est quasi circulaire. Pour GJ 273 b, l'incertitude est importante mais son orbite peut être circulaire.

3. On montre que le rapport $\frac{T^2}{a^3}$ est constant.

a (m)	T (s)	$\frac{T^2}{a^3}$ ($s^2 \cdot m^3$)
$1{,}37 \times 10^{10}$	1 611 360	$1{,}02 \times 10^{-18}$
$5{,}47 \times 10^{9}$	408 101	$1{,}02 \times 10^{-18}$
$1{,}07 \times 10^{11}$	35 760 960	$1{,}05 \times 10^{-18}$
$1{,}27 \times 10^{11}$	46 828 800	$1{,}06 \times 10^{-18}$

On peut s'aider d'un programme Python ou du tableur pour trouver le coefficient de corrélation, très proche de 1 :




```
pente --> 1.0599026361395207e-18
ordonnée à l origine --> -2144305411813.25
coefficient de corrélation --> 0.9999783948902079
```

Les résultats obtenus montrent que la troisième loi de Kepler est vérifiée.

4. a. $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} = 1{,}06 \times 10^{-18}\ s^2 \cdot m^{-3}$

Donc $M = \frac{4\pi^2}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 1{,}06 \times 10^{-18}} = 5{,}58 \times 10^{29}$ kg

b. D'après le document 1, la masse de l'étoile est égale à un quart de la masse du Soleil, soit $5{,}0 \times 10^{29}$ kg. La valeur trouvée est proche de celle de l'énoncé.
c. Le champ de gravitation d'un objet, donc d'une exoplanète, de masse M s'écrit $\mathcal{G} = G \cdot \frac{M}{R^2}$.
Il manque donc le rayon de la planète pour connaître le champ de gravité à la surface de la planète.
Remarque : cette donnée n'est accessible que par la méthode du transit devant l'étoile.

› Synthèse

Sachant que $\frac{M_{étoile}}{M_{Soleil}} = 0{,}25$, en plaçant sur cette donnée sur le graphe du document 3, on voit que la zone d'habitabilité est comprise entre 0,09 et 0,2 U.A. La seule exoplanète habitable possible est GJ 273 b. De plus, son excentricité peut être convenable.
Il manque l'information sur le rayon de l'astre, ce qui ne permet pas de connaître le champ de gravitation à sa surface. Les autres exoplanètes sont hors de la zone habitable.

38 › Analyse

1. D'après le texte, il semble qu'un objet sombre de plusieurs masses solaires réside au centre de notre galaxie, car plusieurs étoiles décrivent une trajectoire elliptique autour de ce foyer. De plus, il est dit dans le texte que le fait que la trajectoire soit purement elliptique a permis d'éliminer un amas de plusieurs masses sombres et ainsi d'estimer une taille de dimension faible, ce qui n'est compatible qu'avec l'existence d'un trou noir.

2. a. Cela signifie que la trajectoire des étoiles est elliptique, comme indiqué dans le début du texte.
b. D'après la première loi de Kepler, l'orbite est elliptique, donc le trou noir est placé à l'un des foyers.

3. a. Entre les dates 1994,32 années et 2002,33 années, soit en 8,01 ans, l'étoile parcourt approximativement une demi-ellipse.
Il faut donc $2 \times 8 = 16$ ans pour effectuer le tour complet de l'ellipse, ce qui donne, en seconde, $365{,}25 \times 24 \times 3\,600 \times 16 = 5{,}0 \times 10^8$ s.
b. On voit que 2 *light-days* (jours-lumière) correspondent à 0,8 cm sur la figure du document
Le jour-lumière est la distance parcourue par la lumière en une journée soit :
$d = c \cdot t = 3{,}00 \times 10^8 \times (24 \times 3\,600) = 2{,}6 \times 10^{13}$ m
On mesure comme longueur du grand axe $2a$ 3,1 cm donc $2a = 7{,}5$ jours-lumière.
Soit $a = 3{,}8$ jours-lumière $= 3{,}8 \times 2{,}6 \times 10^{13}$
$= 9{,}9 \times 10^{13}$ m.

4. a. On cherche à déterminer tout d'abord la distance du trou noir au périapside de l'étoile. On estime graphiquement cette distance :

$r_{\text{péri}} = \dfrac{0{,}2 \times 2}{0{,}8} = 0{,}5$ jour-lumière

$= 1{,}3 \times 10^{13}$ m

De plus, on sait que :

$$v_{\text{péri}} = \sqrt{\text{G} \cdot M\left(\frac{2}{r_{\text{péri}}} - \frac{1}{a}\right)}$$

Or $\dfrac{T^2}{a^3} = \dfrac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M}$, donc $\text{G} \cdot M = \dfrac{4\pi^2 a^3}{T^2}$.

En remplaçant dans l'expression de la vitesse, on obtient :

$$v_{\text{péri}} = \sqrt{\frac{4\pi^2 a^3}{T^2}\left(\frac{2}{r_{\text{péri}}} - \frac{1}{a}\right)}$$

$$= \frac{2\pi}{T}\sqrt{\left(\frac{2a^3}{r_{\text{péri}}} - a^2\right)}$$

$$= \frac{2\pi}{T} a \sqrt{\frac{2a}{r_{\text{péri}}} - 1}$$

D'où $v_{\text{péri}} = \dfrac{2\pi}{5 \times 10^8} \times 9{,}9 \times 10^{13} \times \sqrt{\dfrac{2 \times 9{,}9 \times 10^{13}}{1{,}3 \times 10^{13}} - 1}$

$= 4{,}7 \times 10^6$ m · s^{-1}.

b. $\dfrac{v_{\text{péri}}}{\text{c}} = \dfrac{4{,}7 \times 10^6}{3{,}0 \times 10^8} = 0{,}02$ soit 2 % de la célérité de la lumière.

Le mouvement de l'étoile n'est donc pas considéré comme relativiste car le rapport est inférieur à 10 %.

› Synthèse

En utilisant l'expression de la troisième loi de Kepler, on a :

$\dfrac{T^2}{a^3} = \dfrac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M}$, donc :

$$M = \frac{4\pi^2 \cdot a^3}{\text{G} \cdot T^2}$$

$$= \frac{4\pi^2 \times (9{,}9 \times 10^{13})^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times (5{,}0 \times 10^8)^2}$$

$= 2{,}3 \times 10^{36}$ kg

Comparons la masse du trou noir à la masse de notre Soleil :

$$\frac{M}{M_{\text{S}}} = \frac{2{,}3 \times 10^{36}}{2{,}0 \times 10^{30}} = 1{,}2 \times 10^6$$

Le trou noir SgrA est environ 1 million de fois plus massif que le Soleil.

Ces résultats sont à considérer en ordres de grandeur, car les incertitudes sur les mesures de temps et de distances sont importantes.

39 › Questions préliminaires

1. Il s'agit d'un référentiel lunocentrique.

2. L'expression de la force d'attraction gravitationnelle est :

$$\vec{F} = -\text{G}\frac{m \cdot M_{\text{L}}}{(R_{\text{L}} + h)^2}\vec{u}_{\text{r}} = \text{G}\frac{m \cdot M_{\text{L}}}{(R_{\text{L}} + h)^2}\vec{n}$$

D'après la deuxième loi de Newton, on a : $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

Ainsi : $\vec{a} = \text{G}\dfrac{M_{\text{L}}}{(R_{\text{L}} + h)^2}\vec{n}$ d'où $a = \text{G}\dfrac{M_{\text{L}}}{(R_{\text{L}} + h)^2}$.

3. Le vecteur accélération pour un mouvement circulaire uniforme s'écrit : $\vec{a} = \dfrac{v^2}{r}\vec{n}$ car le mouvement est décrit comme uniforme.

$m\dfrac{v^2}{R_{\text{L}} + h}\vec{n} = \text{G}\dfrac{m \cdot M_{\text{L}}}{(R_{\text{L}} + h)^2}\vec{n}$, donc en effectuant la projection sur $\vec{n}$, on a :

$v^2 = \text{G}\dfrac{M_{\text{L}}}{R_{\text{L}} + h}$ soit $v = \sqrt{\dfrac{\text{G} \cdot M_{\text{L}}}{R_{\text{L}} + h}}$.

4. On détermine la période de révolution :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(R_{\text{L}} + h)^3}{\text{G} \cdot M_{\text{L}}}} = 2\pi\sqrt{\frac{(1\,737 \times 10^3 + 110 \times 10^3)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 7{,}34 \times 10^{22}}}$$

$= 7{,}13 \times 10^3$ s $= 1{,}98$ h, soit près de 2 heures.

› Le problème à résoudre

Les ondes électromagnétiques ne peuvent pas traverser la Lune et la capsule Apollo est cachée par celle-ci une bonne partie de sa trajectoire. Le LEM ne peut donc communiquer avec la capsule qu'au niveau de son horizon comme le montre le schéma du document.

Il faut donc déterminer la durée de parcours sur la partie représentée en gras sur le schéma. L'angle parcouru est de 2β.

Dans le triangle rectangle délimité par la capsule, le LEM et le centre de la Lune, on a :

$\cos\beta = \dfrac{R_{\text{L}}}{R_{\text{L}} + h}$ donc :

$$\beta = \arccos\left(\frac{R_{\text{L}}}{R_{\text{L}} + h}\right)$$

$$= \arccos\left(\frac{1{,}737 \times 10^6}{1{,}737 \times 10^6 + 110 \times 10^3}\right) = 19{,}9°$$

En une durée $T = 1{,}98$ h, la capsule balaye un angle de 360°.

En une durée T_{COM} elle balaye un angle de $2 \times 19{,}9°$.

Par proportionnalité,

$$T_{\text{COM}} = \frac{1{,}98 \times 2 \times 19{,}9}{360} = 0{,}219 \text{ h} = 788 \text{ s}.$$

À chaque révolution, la communication n'est possible que pendant 788 s.

40 **1. a.** On a $r = r_p$ lorsque $\theta = 0°$, donc $r_p = \dfrac{p}{1+e}$.

b. On a $r = r_A$ lorsque $\theta = 180°$, donc $r_A = \dfrac{p}{1-e}$.

2. On a $r = p$ lorsque $\cos\theta = 0$, soit :
$\theta = 90°$ ou $\theta = 270°$.

3. a. D'après la troisième loi de Kepler, on a $\dfrac{T^2}{r^3} = k$ avec k une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur, ici la Terre. Donc comme $r_2 > r_1$, on a : $T_2 > T_1$.

b. On a donc $\dfrac{T_1^2}{r_1^3} = \dfrac{T_2^2}{r_2^3}$, donc :

$$\frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{r_2^3}{r_1^3}} = \sqrt{\left(\frac{800}{200}\right)^3} = 8{,}00$$

4. a. Le centre de la Terre est un des deux foyers de l'ellipse correspondant à l'orbite de transfert.
b. D'après les schémas de l'énoncé, on a $r_p = r_1$ et $r_A = r_2$.

5. a. On trouve $p = 2\dfrac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$ et $e = \dfrac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2}$.

b. Donc $p = 2 \times \dfrac{800 \times 200}{800 + 200} = 320$ km

et $e = \dfrac{800 - 200}{800 + 200} = 0{,}600$.

6. a. On a $2a = r_1 + r_2$, donc $a = \dfrac{r_1 + r_2}{2}$.

b. $a = \dfrac{200 + 800}{2} = 500$ km

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 338

1. Proposition de protocole expérimental
Le programme Python fourni permet de vérifier la troisième loi de Kepler pour le système solaire. Le graphe produit donne la période au carré en fonction du demi-grand axe au cube.
On cherche à utiliser ce programme pour le système d'exoplanètes du système Tau Ceti. Le programme est indépendant de l'astre attracteur, il est donc adaptable à tous types de systèmes satellitaires ou d'exoplanètes. Il suffit donc de modifier les lignes correspondant aux données pour vérifier la troisième loi de Kepler pour le système de Tau Ceti.
Les lignes à modifier sont celles concernant les données du système exoplanétaire.

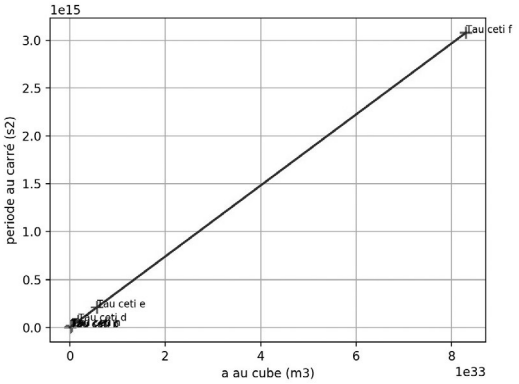
```
LIST_a = [0.105,0.195,0.243,0.374,0.552,1.35
LIST_T = [13.965,35.362,49.41,94.11,168.12,
642.0]
LIST_P = ['Tau ceti b','Tau ceti c','Tau ceti
h','Tau ceti d','Tau ceti e','Tau ceti f']
```

Il est nécessaire aussi de changer le calcul de la période au carré. En effet, les données sont fournies en jours et non pas en années. Il faut donc effacer 365.
Le résultat est donc :

```
for i in range(0, len(LIST_a)):
   LIST_a[i] = (LIST_a[i]*150e9)**3
   LIST_T[i] = (LIST_T[i]*24*3600)**2 #
```

Le fichier complet est disponible sur le site compagnon espace-lycee.editions-bordas.fr ainsi que sur le manuel numérique enseignant.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental proposé
On obtient la représentation suivante :



Avec les résultats de la régression :

```
pente --> 3.7049172362292417e-19
ordonnée à l origine --> 340694993988.75
coefficient de corrélation -->0.9999999713934835
```

On observe que le modèle est valide, puisque le coefficient de corrélation est très proche de 1. La valeur trouvée est $k = 3{,}705 \times 10^{-19}$ s$^2 \cdot$ m^{-3}
La relation s'écrit alors :
$T^2 = 3{,}705 \times 10^{-19} \times a^3$

3. Exploitation du résultat obtenu
• L'incertitude type de *k* se détermine en calculant l'expression suivante :
$u(k) = k \cdot \sqrt{\left(2 \times \dfrac{u(T)}{T}\right)^2 + \left(3 \times \dfrac{u(a)}{a}\right)^2}$. Il faut évaluer les incertitudes $\dfrac{u(T)}{T}$ et $\dfrac{u(a)}{a}$.

Regroupons les calculs dans un tableau :

Planète	**Demi-grand axe a** (UA)	$u(a)$ (UA)	$\frac{u(a)}{a}$	T (jours)	$u(T)$ (jour)	$\frac{u(T)}{T}$
Tau Ceti b	0,105	0,006	0,06	13,965	0,02	0,002
Tau Ceti c	0,195	0,01	0,06	35,362	0,1	0,003
Tau Ceti d	0,374	0,02	0,06	94,11	0,7	0,008
Tau Ceti e	0,552	0,02	0,04	168,12	2,0	0,02
Tau Ceti f	1,35	0,1	0,08	642	30	0,05
Tau Ceti h	0,243	0,003	0,02	49,41	0,80	0,005

On prend les plus grandes valeurs pour $\frac{u(a)}{a}$ et $\frac{u(T)}{T}$.

Donc $\frac{u(a)}{a} = 0{,}06$ et $\frac{u(T)}{T} = 0{,}05$.

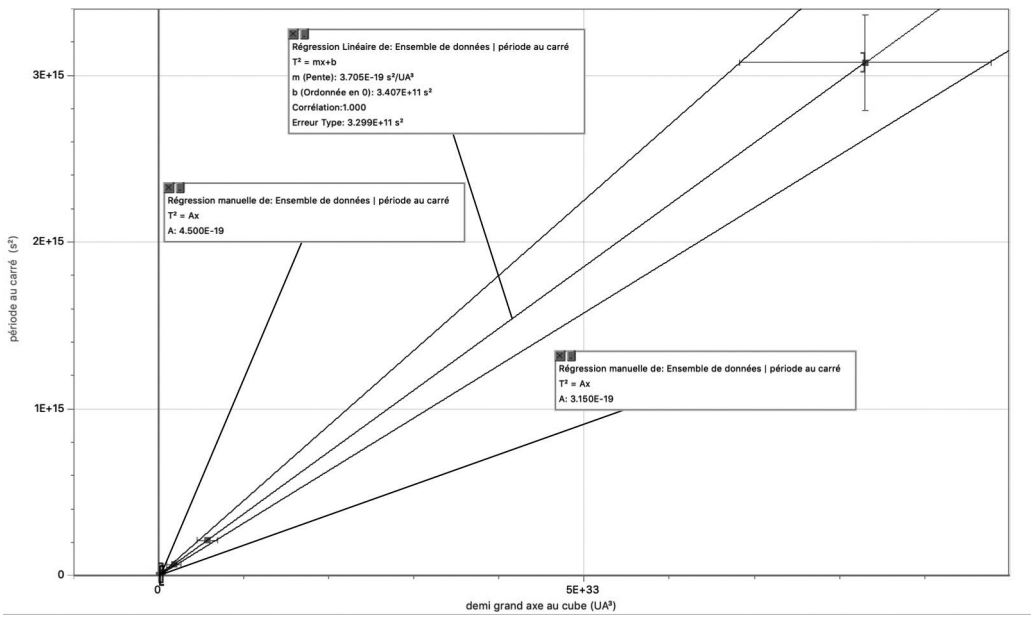
On obtient alors : $u(k) = 3{,}705 \times 10^{-19} \times \sqrt{(2 \times 0{,}05)^2 + (3 \times 0{,}08)^2}$

$= 1 \times 10^{-19}\ \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$

Donc $k = 3 \times 10^{-19} \pm 1 \times 10^{-19}\ \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

Une autre méthode consiste à utiliser les barres d'erreurs et en déduire les droites de pente maximale et minimale.

a (UA)	période (jours)	a^3 (UA^3)	T^2 (s^2)	u(a) (UA)	u(T) (jours)	$u(T^2)$ (s^2)	$u(a^3)$ (m^3)
0.105	13.965	3.907E+30	1.456E+12	0.06	0.02	4.170E+09	6.698E+3
0.195	35.362	2.503E+31	9.335E+12	0.06	0.1	5.280E+10	2.310E+3
0.374	94.11	1.766E+32	6.611E+13	0.06	0.7	9.835E+11	8.497E+3
0.552	168.12	5.677E+32	2.110E+14	0.04	2	5.020E+12	1.234E+3
1.35	642	8.304E+33	3.077E+15	0.08	30	2.876E+14	1.476E+3
0.243	49.41	4.843E+31	1.822E+13	0.02	0.8	5.901E+11	1.196E+3



On trouve

$$u(k) = \frac{4{,}50\times10^{-19} - 3{,}15\times10^{-19}}{2} = 0{,}7\times10^{-19}\ \text{s}^2\cdot\text{m}^{-3}$$

On obtient une valeur proche de celle trouvée par l'autre méthode.

Remarque : Les incertitudes-types des mesures de Tau Ceti f sont grandes, ce qui entraîne une valeur élevée de l'incertitude-type de k.

• D'après l'énoncé, on a : $k = \dfrac{4\pi^2}{G\cdot M_{\text{étoile}}}$.

D'où $M_{\text{étoile}} = \dfrac{4\pi^2}{G\cdot k}$

$$= \frac{4\pi^2}{6{,}67\times10^{-11}\times3{,}705\times10^{-19}}$$

$$= 1{,}59\times10^{30}\ \text{kg}$$

• On sait que $T^2 = k\cdot a^3$, donc $a^3 = \dfrac{T^2}{k}$, donc :

$$a = \left(\frac{T^2}{k}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{(20\times24\times3\,600)^2}{3{,}705\times10^{-19}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$= 2{,}0\times10^{10}$ m, soit près de 0,133 UA.

CHAPITRE 14

Écoulement d'un fluide

Manuel, p. 340

LE PROGRAMME

3. Modélisation de l'écoulement d'un fluide

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Poussée d'Archimède.	Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède. Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède. *Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.*
Écoulement d'un fluide en régime permanent.	Exploiter la conservation du débit volumique pour déterminer la vitesse d'un fluide incompressible.
Débit volumique d'un fluide incompressible. Relation de Bernoulli. Effet Venturi.	Exploiter la relation de Bernoulli, celle-ci étant fournie, pour étudier qualitativement puis quantitativement l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent. *Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'écoulement permanent d'un fluide et pour tester la relation de Bernoulli.*

Conformément au BO spécial n° 2 du 13 février 2020, les notions étudiées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite du baccalauréat à la date de publication du manuel.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 340

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont acquis que la masse volumique d'un fluide, d'un gaz ou d'un liquide rend compte de l'état de dispersion des constituants microscopiques qui le constituent.

› Exemple de réponse attendue

Dans un liquide, les constituants microscopiques sont proches les uns des autres. En revanche, ils sont plus dispersés dans un gaz. La densité de particules est donc plus importante dans un échantillon liquide que dans un échantillon de gaz de même volume. La masse volumique d'un gaz est plus faible que celle d'un liquide. Ainsi, $\rho = 1{,}20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour l'air et $\rho = 9{,}98 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour l'eau liquide.

› En classe de Terminale

La masse volumique d'un fluide (gaz et liquide) est une grandeur régulièrement utilisée dans le chapitre 14 : dans l'**activité 1**, par exemple, la masse volumique du volume d'eau déplacé par un iceberg doit être identifiée pour déterminer la valeur de la poussée d'Archimède qui modélise l'action de l'eau sur celui-ci. Dans l'**activité 2**, il s'agit d'utiliser celle de l'air lors d'un écoulement.

SITUATION 2

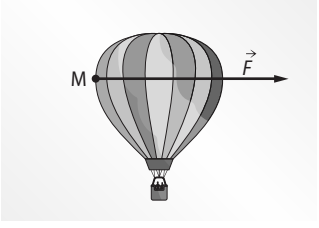
Il s'agit ici de vérifier que les caractéristiques (direction, sens et valeur) de la force pressante qui modélise l'action d'un fluide sur une surface sont maîtrisées par les élèves.

› Exemple de réponse attendue

Par définition, la valeur de la force pressante F est donnée par la relation : $F = P \cdot S$ (voir le deuxième point des acquis indispensables p. 340).

AN : $F = 1\,013 \times 10^2 \times 50 \times 10^{-4} = 5{,}1 \times 10^2$ N

À l'échelle 1 cm pour 200 N, la représentation de la force pressante $\vec{F}$ qui modélise l'action de l'air sur une surface de 50 cm² du ballon modélisée par un point matériel M est :



› En classe de Terminale

Comprendre l'origine de la poussée d'Archimède fait appel à la notion de force pressante. Dans l'**activité 1**, les élèves sont amenés à vérifier l'expression de la poussée d'Archimède, force verticale et résultante des forces pressantes qui modélisent l'action d'un fluide sur un corps immergé (ici, un iceberg dans l'eau des océans).

SITUATION 3

Il s'agit ici de vérifier la maîtrise de la loi fondamentale de la statique des fluides. La valeur de la pression atmosphérique n'est pas rappelée et doit être estimée par les élèves.

› Exemple de réponse attendue

Soient A et B deux points situés respectivement à la surface de l'eau et à la profondeur maximale d'immersion. L'origine des altitudes est choisie au point A en surface où :

$P_A = P_{atm} \approx 1{,}0$ bar $= 1\,000$ hPa.

L'axe des altitudes est orienté vers le bas.

La loi fondamentale de la statique des fluides s'écrit :

$P_B - P_A = \rho \cdot g \cdot (z_A - z_B)$.

Ainsi il vient :

$P_B = P_A + \rho \cdot g \cdot (z_A - z_B)$.

AN :

$P_B = 1{,}0 \times 10^5 + 1\,000 \times 9{,}81 \times (0 - (-15))$

$= 2{,}5 \times 10^5$ Pa $= 2{,}5$ bar

› En classe de Terminale

Comprendre l'origine de la poussée d'Archimède nécessite la maîtrise de la loi fondamentale de la statique des fluides, qui est une formulation de la relation de Bernoulli pour un fluide au repos. Dans l'**activité 3**, les élèves sont amenés à tester la relation de Bernoulli dans le cas d'un écoulement horizontal (étude de la relation entre la pression et la vitesse d'un fluide en écoulement). Il s'agit d'un prolongement du travail réalisé en classe de Première, où la relation entre la pression et l'altitude d'un fluide au repos a été abordée.

ACTIVITÉS

p. 342 **ACTIVITÉ 1**

La poussée d'Archimède

Commentaires pédagogiques et expérimentaux

L'activité présente le double objectif de tester, au moyen du matériel de laboratoire et en tenant compte de sa précision, la validité de l'expression de la poussée d'Archimède, puis d'exploiter cette expression dans le cas concret de flottaison d'un iceberg. Les élèves sont amenés à réaliser des mesures courantes (masses, forces, volumes) et à proposer un encadrement de leurs résultats en tenant compte de leurs incertitudes-types (celles liées à la précision des instruments). On attend la mise en œuvre des mesures les plus précises possibles. Les élèves sont amenés à évaluer, à l'aide de formules fournies, l'incertitude-type d'une grandeur en fonction d'autres grandeurs dont les incertitudes-types associées sont connues (incertitudes-types composées).

Selon la stratégie choisie, tout le matériel proposé ou seulement une partie est amené à être utilisé. Par ailleurs, la masse volumique du matériau (ici l'acier) est fournie mais n'est pas utilisée dans la démarche ; l'idée étant de mettre en évidence qu'elle n'intervient pas dans l'expression de la poussée d'Archimède.

L'animation « Principe d'Archimède » explique l'énoncé de la poussée d'Archimède. Elle montre par ailleurs l'utilisation d'un récipient à trop-plein (le vase de Boudreau) et donne quelques éléments pouvant être repris dans la stratégie à mettre en œuvre.

› Démarche experte

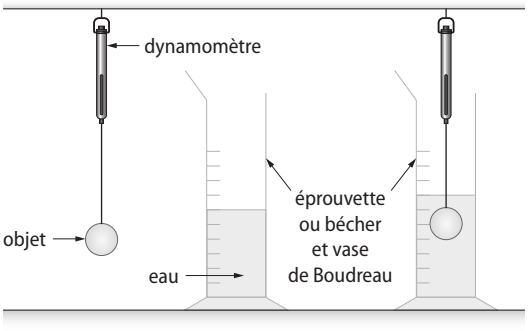
• *Réalisation des mesures* :

On réalise les mesures de :

– la valeur P_1 du poids de l'objet (au moyen du dynamomètre) accompagnée de son incertitude-type $u(P_1)$;

– la valeur P_2 du poids apparent de l'objet entièrement immergé (au moyen du dynamomètre) accompagnée de son incertitude type $u(P_2)$;

– la valeur de la masse m du volume d'eau déplacé par le corps entièrement immergé accompagnée de son incertitude type $u(m)$. Cette mesure se réalise par déplacement d'eau.



Exemple de résultat des mesures : $P_1 = 2{,}1$ N ; $u(P_1) = 0{,}05$ N ; $P_2 = 1{,}5$ N ; $u(P_2) = 0{,}05$ N

$m = 60{,}2$ g et $u(m) = 0{,}05$ g.

Remarque : Le calcul du poids du volume de fluide déplacé peut être réalisé soit à partir d'une mesure

de son volume (par déplacement d'eau) soit à partir d'une mesure de sa masse (par déplacement d'eau grâce au vase de Boudreau). L'analyse de l'incertitude-type sur chaque mesure doit amener l'élève à privilégier une mesure de masse ($u(m) = 0{,}05$ g pour une balance au dg, pour une mesure $m \approx 50$ g) plutôt qu'une mesure de volume ($u(V) = 1$ mL pour une éprouvette de 250 mL et une mesure $V \approx 50$ mL). La mesure de la valeur de la poussée d'Archimède est effectuée à l'aide du dynamomètre. L'incertitude-type sur le résultat de la mesure est $u(F) = 0{,}05$ N dans le cas d'un dynamomètre de portée 5,0 N et de graduation 0,1 N.

• *Détermination de la direction, du sens et de la valeur de la poussée d'Archimède à partir des caractéristiques des forces $\vec{P}_1$ et $\vec{P}_2$:*
À l'équilibre, en notant la tension $\vec{T}$ du ressort du dynamomètre, il vient :
$\vec{P}_1 + \vec{\pi} + \vec{T} = \vec{0}$.
Or $\vec{T} = -\vec{P}_2$, donc $\vec{\pi} = \vec{P}_2 - \vec{P}_1$.
$\vec{\pi}$ est donc verticale et orientée vers le haut.
Par projection sur un axe (Oz) vertical orienté vers le haut :
$-P_1 + \pi = -P_2$ soit $\pi = P_1 - P_2$.
$\pi = 2{,}1 - 1{,}5 = 6{,}0 \times 10^{-1}$ N
$u(\pi) = \sqrt{u(P_1)^2 + u(P_2)^2} = \sqrt{2u(P)^2} = \sqrt{2}\ u(P)$
$u(\pi) = \sqrt{2} \times 0{,}05 = 0{,}08$ N
On peut écrire :
$5{,}2 \times 10^{-1}$ N $\leqslant \pi \leqslant 6{,}8 \times 10^{-1}$ N

• *Détermination du poids du volume d'eau déplacé à partir de sa masse :*
$$P_{eau} = m \cdot g \text{ et } \frac{u(P_{eau})}{P_{eau}} = \sqrt{\left(\frac{u(g)}{g}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2}.$$
Ici, g est une valeur fournie par l'énoncé : $u(g) = 0$.
Il vient alors :
$\frac{u(P_{eau})}{P_{eau}} = \frac{u(m)}{m}$ soit $u(P_{eau}) = g \cdot u(m)$.
$P_{eau} = 60{,}2 \times 10^{-3} \times 9{,}81 = 5{,}91 \times 10^{-1}$ N
$u(P_{eau}) = 0{,}05 \times 10^{-3} \times 9{,}81 = 5 \times 10^{-4}$ N
On peut écrire :
$5{,}90 \times 10^{-1}$ N $\leqslant P_{eau} \leqslant 5{,}92 \times 10^{-1}$ N
(avec $u(P_{eau})$ arrondie à 1×10^{-3} N).

• *Vérification de l'expression de la poussée d'Archimède :*
Voir *Démarche élémentaire*, réponse à la question **1.c** ci-après.

• *Volume de la partie émergée de l'iceberg :*
Voir *Démarche élémentaire*, réponse à la question **2** ci-après.

› Démarche avancée

1. a • *Détermination par déplacement d'eau de la valeur du poids P_{eau} du volume d'eau déplacé par le corps entièrement immergé :*
Voir *Démarche élémentaire*, réponse à la question **1. b.** ci-après.

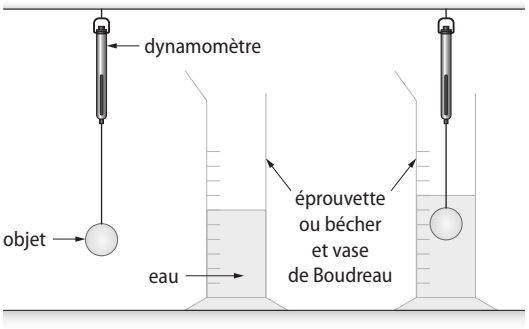
• *Détermination au moyen du dynamomètre de la force qui modélise l'action mécanique exercée par l'eau sur l'objet immergé :*
Voir *Démarche élémentaire*, réponse à la question **1. a.** ci-après.
b. Voir *Démarche élémentaire*, réponse à la question **1. c.** ci-après.

2. a. Voir *Démarche élémentaire*, réponses aux questions **2. a.** et **2. b.** ci-après.
b. Voir *Démarche élémentaire*, réponse à la question **2. c.** ci-après.

› Démarche élémentaire

Matériel : dynamomètre 5,0 N – 0,1 N ; objet cylindrique ($L = 9{,}32$ cm, $\varnothing = 2{,}82$ cm soit un volume de 58 cm³) ; balance au dg

1. a. Mesure du poids P_1 de l'objet et de son poids apparent P_2 :



$P_1 = 2{,}1$ N, $u(P_1) = 0{,}05$ N ;
$P_2 = 1{,}5$ N, $u(P_2) = 0{,}05$ N.
À l'équilibre (on pourra proposer un schéma de modélisation des forces), en notant la tension $\vec{T}$ du ressort du dynamomètre, il vient :
$\vec{P}_1 + \vec{\pi} + \vec{T} = \vec{0}$
Or $\vec{T} = -\vec{P}_2$, donc $\vec{\pi} = \vec{P}_2 - \vec{P}_1$.
$\vec{\pi}$ est donc verticale et orientée vers le haut.
Par projection sur un axe (Oz) vertical orienté vers le haut :
$-P_1 + \pi = -P_2$ soit $\pi = P_1 - P_2$.
$\pi = 2{,}1 - 1{,}5 = 6{,}0 \times 10^{-1}$ N
$u(\pi) = \sqrt{u(P_1)^2 + u(P_2)^2} = \sqrt{2u(P)^2} = \sqrt{2}\ u(P)$ soit :
$u(\pi) = \sqrt{2} \times 0{,}05 = 0{,}08$ N

On peut écrire :
$5{,}2\times10^{-1}\ \text{N} \leqslant \pi \leqslant 6{,}8\times10^{-1}\ \text{N}$

b. Mesure du poids P_{eau} du volume d'eau déplacé par l'objet immergé : après avoir taré la balance, rempli le vase de Boudreau et par déplacement d'eau : $m = 60{,}2$ g, $u(m) = 0{,}05$ g.

$$P_{eau} = m \cdot g \text{ et } \frac{u(P_{eau})}{P_{eau}} = \sqrt{\left(\frac{u(g)}{g}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2}.$$

Ici, g est une valeur fournie par l'énoncé : $u(g) = 0$. Il vient alors :

$$\frac{u(P_{eau})}{P_{eau}} = \frac{u(m)}{m} \text{ soit } u(P_{eau}) = g \cdot u(m).$$

$P_{eau} = 60{,}2\times10^{-3}\times9{,}81 = 5{,}91\times10^{-1}$ N

$u(P_{eau}) = 0{,}05\times10^{-3}\times9{,}81 = 5\times10^{-4}$ N

On peut écrire : $5{,}90\times10^{-1}\ \text{N} \leqslant P_{eau} \leqslant 5{,}92\times10^{-1}\ \text{N}$ (avec $u(P_{eau})$ arrondie à 1×10^{-3} N).

c. En s'appuyant sur la valeur moyenne du résultat des mesures ($\pi = 6{,}0\times10^{-1}$ N et $P_{eau} = 5{,}91\times10^{-1}$ N), on constate que $\pi \approx P_{eau}$. Par ailleurs, l'intervalle des valeurs de P_{eau} probables est contenu dans celui des valeurs de π probables. Il existe donc plusieurs valeurs possibles pour lesquelles π est parfaitement égal à P_{eau}. Aux incertitudes de mesures près, on peut considérer que $\pi = P_{eau}$. L'expression de la poussée d'Archimède est validée.

Remarque : D'après l'incertitude-type sur chaque mesure, la valeur P_{eau} du poids du volume d'eau déplacé est connue avec davantage de précision que la valeur π. En choisissant π comme valeur de référence, l'écart relatif entre le poids du volume d'eau déplacé et la valeur de poussée d'Archimède vaut $\varepsilon = \dfrac{6{,}0 - 5{,}91}{5{,}91} = 1{,}6$ %. L'expression de la poussée d'Archimède est validée.

2. a. Les actions mécaniques qui agissent sur un iceberg flottant à la surface de l'eau se compensent. Ces actions de la Terre et de l'eau sont respectivement modélisées par le poids $\vec{P}$ de l'iceberg et la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$.

b. À l'équilibre : $\vec{P} + \vec{\pi} = \vec{0}$. Projetée sur un axe (Oz) vertical orienté vers le haut, la relation s'écrit :
$-m_{iceberg} \cdot g + \rho_{eau\ océans} \cdot V_{immergé} \cdot g = 0$.

Ainsi il vient :
$\rho_{iceberg} \cdot V_{iceberg} \cdot g = \rho_{eau\ océans} \cdot V_{immergé} \cdot g$

$$V_{immergé} = \frac{\rho_{glace}}{\rho_{eau\ des\ océans}} \cdot V_{iceberg}$$

(avec $V_{immergé}$ le volume immergé de l'iceberg et $V_{iceberg}$ son volume total).

c. $V_{immergé} = \dfrac{910}{1\,024} V_{iceberg} = 0{,}89\ V_{iceberg}$

$\approx 90\ \%\ V_{iceberg}$

Environ $^1/_{10} = 10$ % du volume total d'un iceberg émerge de la surface de l'eau.

p. 343 **ACTIVITÉ 2**

Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement d'un fluide

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

L'activité, présentée sous forme de démarche expérimentale, introduit les grandeurs qui caractérisent l'écoulement d'un fluide : vitesse d'écoulement et débit volumique. L'élève est amené à mesurer, à l'aide d'un pointage vidéo, la vitesse d'un liquide en écoulement dans une burette pour une chute de 5 mL (dans un premier temps entre les graduations 0 et 5 mL puis, dans un second temps, entre les graduations 20 et 25 mL). L'activité amène ensuite l'élève à déterminer le débit volumique du fluide, à établir et à vérifier la validité de la relation entre la vitesse du fluide et le débit volumique.

La vidéo « Écoulement dans une bouteille percée » montre les écoulements produits par une bouteille percée rempli d'eau. Des trous à des hauteurs différentes montrent des vitesses de fluide croissantes. Cette vidéo permet un premier questionnement de l'élève sur les notions de vitesse de fluide, de débit et sur leur évolution dans le temps.

1. a. Étalonnage des enregistrements vidéos : 7,0 cm entre les graduations 0 et 5 mL de la burette graduée.

Fréquence de prise de vue : 10 images/s.

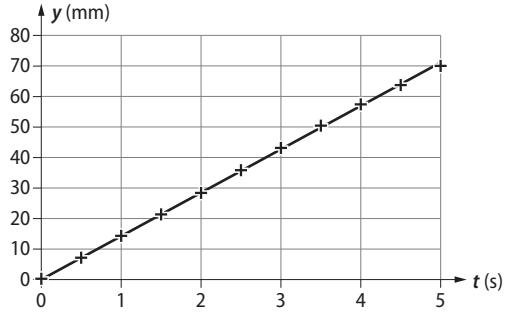
Choisir pour origine des dates t l'image pour laquelle le point M se situé en O.

Il est possible de ne pointer qu'une position sur 5 pour éviter un pointage fastidieux.

$\varnothing_{int} = 9{,}0$ mm soit $S = 6{,}4\times10^{-5}$ m^2.

t (s)	x (mm)	y (mm)
0	1,95	0
0,5	1,53	7,24
1	2,09	14,5
1,5	1,95	21,6
2	2,09	28,9
2,5	2,23	36,0
3	1,91	43,1
3,5	2,09	50,4
4	1,81	57,2
4,5	1,81	63,7
5	2,09	70,1

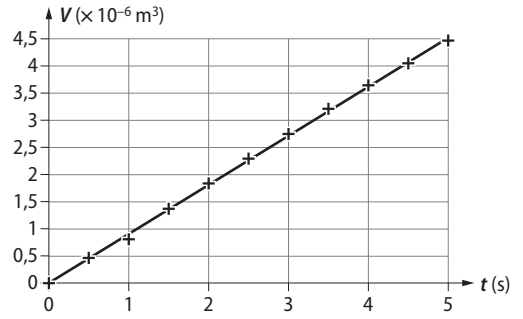
La représentation graphique $y = f(t)$ obtenue est la suivante :



b. On remarque que $y = f(t)$ est du type $y = a \cdot t$ avec $a = v = (14{,}23 \pm 0{,}11)$ mm · s^{-1}. Comme $V = S \cdot y$, on obtient les données suivantes :

t (s)	y (mm)	V ($\times 10^{-6}$ m^3)
0	0	0
0,5	7,24	0,4604
1	14,5	0,9220
1,5	21,6	1,373
2	28,9	1,838
2,5	36,0	2,289
3	43,1	2,741
3,5	50,4	3,205
4	57,2	3,637
4,5	63,7	4,050
5	70,1	4,457

La représentation graphique $V = f(t)$ correspond à celle d'une fonction linéaire. V est du type : $V = a \cdot t$, donc V est proportionnel à la durée d'écoulement t.



Après modélisation de la courbe $V = f(t)$ par une fonction linéaire :
$V = a \cdot t$ avec $a = (905 \pm 7) \times 10^{-9}$ m^3 · s^{-1}.

c. D'après les unités, a est le débit volumique Q du fluide : $Q \approx 0{,}91$ mL · s^{-1}. Il s'agit du débit volumique du fluide traversant n'importe quelle section de la burette.

2. $Q = (623 \pm 5) \times 10^{-9}$ m^3 · s^{-1} $\approx 0{,}62$ mL · s^{-1}
$v = (9{,}79 \pm 0{,}08)$ mm · s^{-1}

› Conclusion

3. a. m^3 · s^{-1} = m · s^{-1} · m^2 donc $Q = v \cdot S$.

b. 1re phase :
$v \cdot S = 14{,}23 \times 10^{-3} \times \pi \times (4{,}5 \times 10^{-3})^2$
$= 9{,}053 \times 10^{-7}$ m · s^{-1} · m^2 $\approx 9{,}1 \times 10^{-7}$ m^3 · s^{-1}
$= 0{,}91$ mL · s^{-1}

2e phase :
$v \cdot S = 9{,}79 \times 10^{-3} \times \pi \times (4{,}5 \times 10^{-3})^2$
$= 6{,}228 \times 10^{-7}$ m · s^{-1} · m^2
$\approx 6{,}3 \times 10^{-7}$ m^3 · s^{-1} = 0,63 mL · s^{-1}

Dans les deux cas, on a bien $Q = v \cdot S$. La relation est vérifiée.

c. En régime permanent, Q = constante. L'écoulement du fluide dans une burette peut donc être considéré permanent pour une chute de 5,0 mL de fluide, pas pour une chute de 25 mL.

p. 344 **ACTIVITÉ 3**

Relation de Bernoulli

Commentaires pédagogiques

L'activité, présentée sous forme de démarche d'investigation, consiste à tester la relation de Bernoulli dans le cas d'un écoulement de l'air de débit volumique connu dans un conduit horizontal en régime permanent. Les élèves sont amenés à réaliser des mesures de la pression de l'air pour différents diamètres du conduit. L'activité propose ensuite de

vérifier la relation $P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 = \text{constante}$ par le tracé du graphique $P = f(v^2)$.

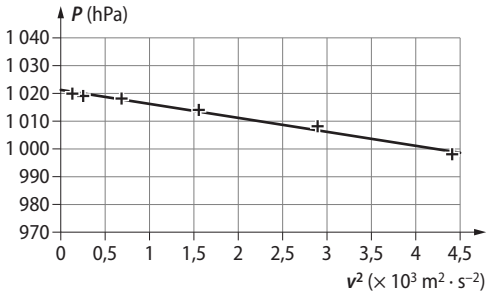
› Mesures et analyse

1. Le montage est réalisé à partir de deux bouteilles en matière plastique de 33 cL assemblées entre elles. L'écoulement de l'air est assuré par une aspiration (aspirateur) dont le débit maximal est annoncé à 44,5 L · s^{-1} (notice du constructeur). Celle valeur dépend de l'état du filtre, du niveau de remplissage du sac et du type de sol aspiré.
Le débit d'aspiration moyen d'un aspirateur ménager avec sac est estimé entre 38 et 40 L · s^{-1}.

P (hPa)	∅ (m)
998,0	0,0270
1 008	0,0300
1 014	0,0350
1 018	0,0430
1 019	0,0550
1 020	0,0650

2. et **3.** $v = \frac{Q}{S}$ soit $v = \frac{38 \times 10^{-3}}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}}$

P (hPa)	∅ (m)	***v*** (m · s^{-1})	v^2 (m^2 · s^{-2})
998,0	0,0270	66,40	4 409
1 008	0,0300	53,79	2 893
1 014	0,0350	39,52	1 562
1 018	0,0430	26,18	685,4
1 019	0,0550	16,00	256,1
1 020	0,0650	11,46	131,3



$P = a \cdot v^2 + b$ avec :
$a = (-5{,}0 \pm 0{,}8) \times 10^{-1}$ kg · m^{-3}
$b = (1{,}0211 \pm 0{,}0018) \times 10^5$ Pa

4. Dans le cas d'un écoulement horizontal, la relation de Bernoulli s'écrit : $P_M + \frac{1}{2}\rho \cdot {v_M}^2 = \text{constante}$, soit $P_M = \text{constante} - \frac{1}{2}\rho \cdot {v_M}^2$.

$P_M = f({v_M}^2)$ est bien une fonction affine, ce qui est en accord avec l'évolution constatée expérimentalement. La courbe tracée permet donc de vérifier la relation de Bernoulli.
La valeur du coefficient directeur prévue par la relation de Bernoulli vaut $a = -\frac{1}{2}\rho$, soit $a = -0{,}59$ kg · m^{-3} pour de l'air à 25 °C (–0,58 kg · m^{-3} à 30 °C). Expérimentalement, a est compris entre –0,42 kg · m^{-3} et –0,58 kg · m^{-3}. L'écart constaté s'explique par un débit volumique dont la valeur n'est pas connue avec précision (38 L · s^{-1} est une estimation cohérente) et par l'existence de turbulences (à l'origine de chutes de pression locales le long de l'écoulement).

› Conclusion

5. Pour un écoulement en régime permanent, lorsque la section du conduit se rétrécit (son diamètre diminue), alors la vitesse d'un fluide augmente. Une augmentation de la vitesse du fluide s'accompagne d'une baisse de sa pression P. Ce phénomène, nommé effet Venturi, est modélisé par la relation de Bernoulli. Ainsi, lors d'une accumulation de lipides et de tissus fibreux dans une artère, le diamètre de l'artère est réduit et l'écoulement sanguin est obstrué. Cela se traduit par une chute de la pression artérielle à l'intérieur de la sténose.

p. 345 **ACTIVITÉ 4**

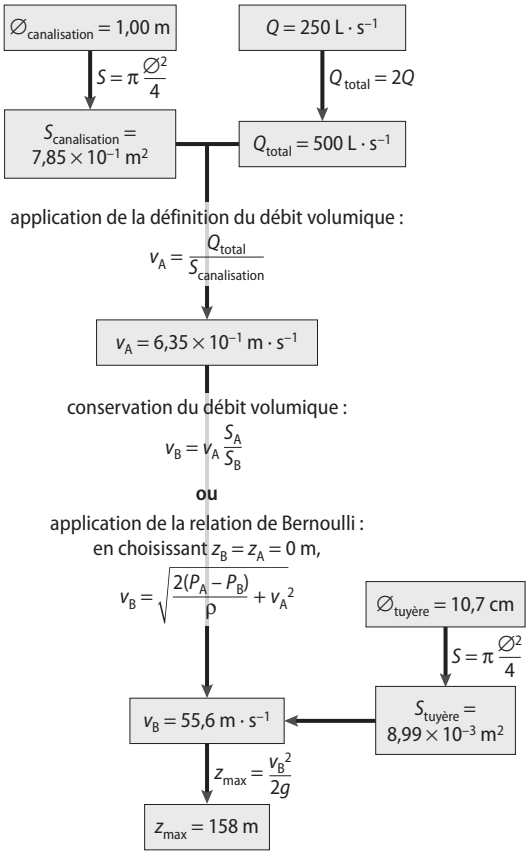
Hauteur d'un jet d'eau

Commentaires pédagogiques

L'activité consiste à élaborer une stratégie de résolution permettant de déterminer la valeur théorique de la hauteur du jet d'eau du lac Léman puis de valider le résultat au moyen d'une photo. L'élève est amené à exploiter la relation entre le débit volumique d'un écoulement et la vitesse du fluide, la conservation du débit volumique en régime permanent ainsi que la relation de Bernoulli.

› Résolution

La démarche peut se présenter sous forme de carte mentale mettant en évidence les étapes de la stratégie de résolution :



› Validation du résultat

On estime la hauteur d'un étage à 3 m. Sur la photo, la hauteur d'un immeuble d'environ 5 étages (soit 18 m) mesure 1,0 cm ; celle du jet d'eau mesure 8,0 cm, soit environ 144 m en réalité.
L'écart constaté s'explique principalement par la présence de frottements exercés par l'air sur le jet d'eau (non pris en compte dans la résolution) et du vent, responsable de la trajectoire non rectiligne du jet d'eau sur la photo.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel

p. 350

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la poussée d'Archimède est une force qui modélise la résultante des actions exercées par un fluide sur un objet immergé. Le poids d'un corps modélise l'action attractive de la Terre qu'il subit.
La proposition B est une bonne réponse car la poussée d'Archimède modélise la résultante des actions exercées par un fluide sur un objet immergé. Elle a pour origine les variations de la pression selon la profondeur au sein d'un fluide.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car les frottements d'un fluide sur un corps existent lorsque celui-ci est en mouvement. Tout corps immergé, même au repos, subit la poussée d'Archimède.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car d'après son expression vectorielle ($\vec{\pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$), cette force est toujours verticale mais dirigée vers le haut.
La proposition B est une bonne réponse car son expression vectorielle s'écrit $\vec{\pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$. Elle est de sens opposé à $\vec{g}$ et de même direction.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la valeur de cette force dépend de la masse volumique du fluide, et non pas de celle du corps immergé.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la valeur de la poussée d'Archimède dépend de la masse volumique du fluide, et non pas de celle du corps immergé.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la poussée d'Archimède est toujours verticale mais dirigée vers le haut donc de sens opposé à $\vec{g}$.
La proposition C est une bonne réponse car la poussée d'Archimède est une force verticale orientée vers le haut, donc de sens opposé à celui du champ de pesanteur $\vec{g}$ et dont la valeur dépend de la masse volumique du fluide déplacé.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le débit volumique Q est inversement proportionnel à la durée Δt de l'écoulement : $Q = \frac{V}{\Delta t}$.
La proposition B est une bonne réponse car le débit volumique Q est proportionnel à la vitesse v de l'écoulement : $Q = v \cdot S$.
La proposition C est une bonne réponse car le débit volumique Q est proportionnel à l'aire S de la section du conduit : $Q = v \cdot S$.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, par définition, en régime permanent, le débit volumique Q d'un fluide traversant la section S d'un conduit est constant au cours du temps. Néanmoins, si l'aire S de la section est amenée à varier, alors c'est la valeur de la vitesse d'écoulement qui sera modifiée pour que la valeur de Q reste constante : $Q = v \cdot S$.
La proposition B est une bonne réponse car, par définition, en régime permanent, le débit volumique Q d'un fluide traversant la section S d'un conduit est constant au cours du temps. Si l'aire S de la section est amenée à varier, alors la vitesse d'écoulement sera modifiée pour que la valeur de Q reste constante : $Q = v \cdot S$.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car, par définition, en régime permanent, le débit volumique Q d'un fluide traversant la section S d'un conduit est constant au cours du temps.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, en régime permanent, le débit volumique Q d'un fluide est constant au cours du temps : $Q_{(A)} = Q_{(B)}$.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, en régime permanent, la conservation du débit volumique Q d'un fluide s'écrit : $Q_{(A)} = Q_{(B)}$ soit $v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$. Si l'aire S de la section est amenée à varier, alors c'est la valeur de la vitesse d'écoulement qui sera modifiée : si $S_A \neq S_B$, alors $v_A \neq v_B$.
La proposition C est une bonne réponse car, en régime permanent, la vitesse v du fluide et l'aire S de la section traversée sont deux grandeurs inversement proportionnelles : si $S_A > S_B$, alors $v_A < v_B$.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, dans la relation de Bernoulli $P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z =$ constante, v désigne la vitesse du fluide en écoulement et non son volume.
La proposition B est une bonne réponse car dans la relation de Bernoulli :
$P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z =$ constante, P désigne la pression du fluide, v la vitesse de son écoulement et z l'altitude.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car dans la relation de Bernoulli :
$P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z =$ constante, P désigne la pression du fluide en écoulement et non son poids.

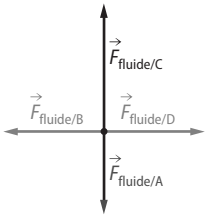
8 La proposition A est une bonne réponse car, dans le cas d'un conduit horizontal, l'altitude z est constante et la relation de Bernoulli s'écrit : $P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 =$ constante. Ainsi, si v augmente, alors P diminue de manière à ce que la relation précédente reste vérifiée. Ainsi, pour deux points A et B situés sur la même ligne de courant, si $v_A < v_B$ alors $P_A > P_B$: il s'agit de l'effet Venturi.
La proposition B est une bonne réponse car, dans le cas d'un conduit horizontal, l'altitude z est constante et la relation de Bernoulli s'écrit :
$P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 =$ constante.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, dans le cas d'un conduit horizontal, $z_A = z_B$ et la relation de Bernoulli s'écrit :
$P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot {v_A}^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot {v_B}^2$. Il vient alors :
$(P_A - P_B) = \frac{1}{2}\rho \cdot (v_B^2 - v_A^2)$.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, d'après le principe de Venturi pour deux points A et B situés sur la même ligne de courant, si $v_A > v_B$ alors $P_A < P_B$.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, d'après la conservation du débit volumique Q d'un fluide : $Q_{(A)} = Q_{(B)}$, soit $v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$. Ainsi, si $S_A \neq S_B$ alors $v_A \neq v_B$.
La proposition C est une bonne réponse car, pour un écoulement en régime permanent, la pression P d'un fluide diminue lorsque sa vitesse v augmente (et inversement).

Acquérir les bases p. 351

› 1. La poussée d'Archimède

10 **1. a.** Le corps immergé est modélisé par un point.



b. Les forces pressantes $\vec{F}_{\text{fluide/B}}$ et $\vec{F}_{\text{fluide/D}}$ se compensent. Elles sont de même direction, de sens opposés et de même valeur car chaque surface d'aire identique, étant plongée à la même profondeur, subit la même pression.
En revanche, $\vec{F}_{\text{fluide/C}}$ et $\vec{F}_{\text{fluide/A}}$ ne se compensent pas. De même direction et de sens opposés, elles ne possèdent pas la même valeur : $F_{\text{fluide/C}} > F_{\text{fluide/A}}$ car la pression en C est supérieure à celle en A.
2. a. La résultante des forces qui modélisent l'action du fluide sur le corps immergé est verticale orientée vers le haut et de valeur égale au poids du volume d'eau déplacé. Il s'agit de la poussée d'Archimède : $\vec{F}_{\text{fluide/B}} + \vec{F}_{\text{fluide/D}} + \vec{F}_{\text{fluide/C}} + \vec{F}_{\text{fluide/A}} = \vec{\pi}$.

b. $\vec{\pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g} = \rho_f \cdot g \cdot V \cdot \vec{k}$

11 **1.** La poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ est la résultante des forces pressantes $\vec{F}$ qui modélisent les actions mécaniques du fluide sur la surface d'un objet immergé. Ses caractéristiques sont sa direction verticale, son sens dirigé vers le haut et sa valeur π égale au poids du volume de fluide déplacé : $\pi = \rho_f \cdot V \cdot g$, où ρ_f désigne la masse volumique du fluide, V le volume de fluide déplacé (c'est-à-dire le volume du corps immergé) et g la valeur du champ de pesanteur terrestre.

2. Première manière : on utilise la relation $\pi = \rho_f \cdot V \cdot g$.

AN : $\pi = 45{,}9 \times 10^{-3} \times 9{,}81 = 4{,}50 \times 10^{-1}$ N.

Seconde manière : à l'équilibre, lorsque le corps est immergé, il vient la relation :

$\vec{P_1} + \vec{\pi} + \vec{T} = \vec{0}$

où $\vec{P_1}$, $\vec{T}$ et $\vec{P_2}$ désignent respectivement le poids du corps non immergé, la tension du dynamomètre lorsque le corps est immergé et le poids apparent du corps immergé.

Or $\vec{T} = -\vec{P_2}$ donc $\vec{P_1} + \vec{\pi} = \vec{P_2}$.

Par projection sur un axe (Oz) vertical orienté vers le haut :

$-P_1 + \pi = -P_2$ soit $\pi = P_1 - P_2$.

AN : $\pi = 1{,}97 - 1{,}52 = 4{,}50 \times 10^{-1}$ N

12 **1.** $P_1 = m \cdot g$ et $\pi = \rho_f \cdot g \cdot V$.

AN : $P_1 = 200 \times 9{,}81 = 1{,}96 \times 10^3$ N

$\pi = 1{,}0 \times 10^3 \times 9{,}81 \times 0{,}19 = 1{,}9 \times 10^3$ N

2. Échelle de représentation : 1 cm pour 10^3 N.

3. $P_2 = P_1 - \pi$.

AN : $P_2 = 1{,}96 \times 10^3 - 1{,}9 \times 10^3 = 9{,}8 \times 10^2$ N.

$m = \dfrac{P_2}{g}$

AN : $m = 10$ kg

13 **1.** $\vec{\pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$

π : valeur de la poussée d'Archimède en N ;

ρ_f : masse volumique du fluide en kg · m^{-3} ;

V : volume du fluide déplacé en m^3 ;

g : intensité du champ de pesanteur terrestre en N · kg^{-1} ou m · s^{-2}.

2. $P_A = 91{,}8 \times 10^{-3} \times 9{,}81 = 9{,}01 \times 10^{-1}$ N

$P_{A'} = 135 \times 10^{-3} \times 9{,}81 = 1{,}32$ N

$P_B = 267 \times 10^{-3} \times 9{,}81 = 2{,}62$ N

3. • Expériences 1 et 2 :

a. Paramètre mis en jeu : volume du corps immergé.

b. Influence : $\pi_1 = 0{,}901 - 0{,}57 = 0{,}33$ N

$\pi_2 = 1{,}32 - 0{,}83 = 0{,}49$ N

Lorsque le volume du corps immergé augmente, la valeur de la poussée d'Archimède augmente.

• Expériences 1 et 3 :

a. Paramètre mis en jeu : profondeur d'immersion.

b. Influence : $\pi_1 = \pi_3 = 0{,}901 - 0{,}57 = 0{,}33$ N

La profondeur d'immersion n'a pas d'influence sur la valeur de la poussée d'Archimède.

• Expériences 1 et 4 :

a. Paramètre mis en jeu : masse volumique du corps immergé.

b. Influence :

$\pi_1 = 0{,}901 - 0{,}57 = 0{,}33$ N

$\pi_4 = 2{,}62 - 2{,}3 = 0{,}32$ N

La masse volumique du corps immergé n'a pas d'influence sur la valeur de la poussée d'Archimède.

• Expériences 1 et 5 :

a. Paramètre mis en jeu : masse volumique du fluide.

b. Influence :

$\pi_1 = 0{,}901 - 0{,}57 = 0{,}33$ N

$\pi_5 = 0{,}91 - 0{,}64 = 0{,}27$ N

Lorsque la masse volumique du fluide déplacé diminue, la valeur de la poussée d'Archimède diminue.

c. Ces résultats valident l'expression de la poussée d'Archimède. π dépend du volume de fluide déplacé et de sa masse volumique : $\pi = \rho_f \cdot V \cdot g$.

› 2. Écoulement d'un fluide incompressible

14 **1. a.** Pour faire un plein de 50 L, la durée est $\Delta t \approx 5$ min.

b. Débit volumique : $Q = \dfrac{V}{\Delta t}$.

AN : $Q = \dfrac{50}{5} = 10$ L · min^{-1}

c. $Q = 10$ L · min^{-1} $= 1{,}7 \times 10^{-4}$ m^3 · s^{-1}. Le résultat obtenu est cohérent. L'estimation faite en **1. a**. est correcte.

2. a. $S = \pi \dfrac{D^2}{4}$.

AN : $S = 2{,}0 \times 10^{-4}$ m^2

b. $Q = v \cdot S$ soit $v = \dfrac{Q}{S}$.

AN : $v = \dfrac{4{,}0 \times 10^{-4}}{2{,}0 \times 10^{-4}} = 2{,}0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

15 **1. a.** Le débit volumique Q d'un fluide représente le volume de fluide qui traverse une section S du conduit par unité de temps : $Q = \dfrac{V}{\Delta t}$.

b. $Q = 5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} = 8{,}3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

2. a. $Q = \dfrac{V}{\Delta t}$ donc $V = Q \cdot \Delta t$.

AN : $V = 8{,}3 \times 10^{-5} \times 1{,}0 = 8{,}3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 83 \text{ mL}$ de sang chaque seconde.

b. $Q = v \cdot S$ donc $v = \dfrac{Q}{S}$.

AN : $v = \dfrac{8{,}3 \times 10^{-5}}{2{,}5 \times 10^{-4}} = 3{,}3 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3. a. Lorsque l'aire de la section traversée diminue, le débit volumique sanguin conserve la même valeur : $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

b. La vitesse du sang est alors plus importante que dans une artère saine. Si S diminue, alors v augmente pour conserver Q constant ($Q = v \cdot S$).

16 **1. a.** On utilise la relation définissant le débit volumique en régime permanent : $Q = v \cdot S$. L'énoncé indique les valeurs de la vitesse $v = 1{,}7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et de diamètre de la section $D = 25 \text{ mm} = 25 \times 10^{-3}$ m. L'aire S de la section circulaire droite est donnée par $S = \pi \dfrac{D^2}{4}$.

On convertit les m^3 en L : 1 000 L ou 10^3 L = 1 m^3 et une seconde en heure : 1 h = 3 600 s.

AN : $Q = 1{,}7 \times \dfrac{\pi \times (25 \times 10^{-3})^2}{4} = 8{,}3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$= 8{,}3 \times 10^{-4} \times 10^3 \times 3\,600$

$= 3{,}0 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$

b. On utilise la relation définissant le débit volumique : $Q = \dfrac{V}{\Delta t}$ soit $\Delta t = \dfrac{V}{Q}$.

AN : $\Delta t = \dfrac{12}{3{,}0 \times 10^3} = 4{,}0 \times 10^{-3} \text{ h} = 14 \text{ s}$

2. La conservation du débit volumique Q d'un fluide s'écrit :

$Q_{(A)} = Q_{(B)}$ soit $v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$.

Ainsi, on peut écrire $v_B = v_A \cdot \dfrac{S_A}{S_B}$. Il faut convertir l'aire S en m^2 ($1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$).

AN : $v_B = \dfrac{8{,}3 \times 10^{-4}}{2{,}0 \times 10^{-4}} = 4{,}1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

17 **1.** $Q = v_A \cdot S_A$ donc $S_A = \dfrac{Q}{v_A}$.

AN : $S_A = \dfrac{900}{3\,600 \times 10^3 \times 125} = 2{,}0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

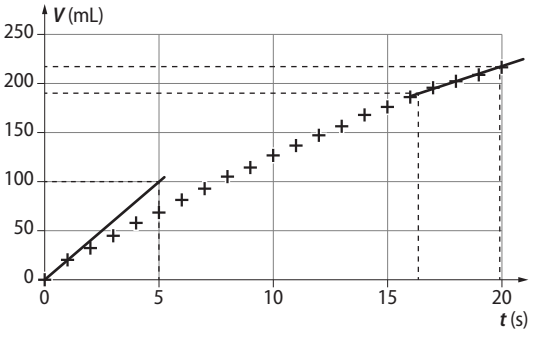
2. a. $Q = v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$

b. $v_B = \dfrac{v_A \cdot S_A}{S_B}$

AN : $v_B = \dfrac{125 \times 2{,}0 \times 10^{-6}}{\pi \times \dfrac{(13 \times 10^{-3})^2}{4}} = 1{,}9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

18 **1. a.** $V = f(t)$ n'est pas une fonction linéaire. Le débit volumique n'est donc pas constant.

b.



$Q_{(t = 0 \text{ s})} = \dfrac{100 \times 10^{-3}}{5} = 2 \times 10^{-2} \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$

$Q_{(t = 16{,}5 \text{ s})} = \dfrac{30 \times 10^{-3}}{3{,}5} = 8{,}6 \times 10^{-3} \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$

Le débit volumique n'est pas constant.

2. a. $v = \dfrac{Q}{S}$.

AN : $v_{(t = 0 \text{ s})} = \dfrac{2 \times 10^{-2} \times 10^{-3}}{\pi \times \dfrac{(8{,}0 \times 10^{-2})^2}{4}} = 4{,}0 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$v_{(t = 16{,}5 \text{ s})} = \dfrac{8{,}6 \times 10^{-3} \times 10^{-3}}{\pi \times \dfrac{(8{,}0 \times 10^{-2})^2}{4}} = 1{,}7 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

b. La section du trou de la bouteille est plus faible que le diamètre de la bouteille : la vitesse de la solution y est donc plus importante : $v = \dfrac{Q}{S}$.

3. Les réponses sont en accord avec les observations faites sur l'animation : la vitesse d'écoulement du fluide dans la bouteille est plus faible qu'en sortie par le trou.

› 3. Relation de Bernoulli et conséquences

19 **1.** Les deux points situés sur la même ligne de courant sont notés 1 et 2. La relation de Bernoulli s'écrit donc :

$$P_1+\frac{1}{2}\rho\cdot v_1^2+\rho\cdot g\cdot z_1=P_2+\frac{1}{2}\rho\cdot v_2^2+\rho\cdot g\cdot z_2$$

2. À partir de l'égalité précédente, il vient :

$$P_1+\frac{1}{2}\rho\cdot v_1^2+\rho\cdot g\cdot z_1-\frac{1}{2}\rho\cdot v_2^2-\rho\cdot g\cdot z_2=P_2,$$

soit : $P_2=P_1+\frac{1}{2}\rho(v_1^2-v_2^2)+\rho\cdot g(z_1-z_2)$

Les données P_1, ρ_{eau}, v_1, v_2, z_1 et z_2 sont fournies en données ou lues sur la figure.

AN :

$$P_2=1{,}0\times10^5+\frac{1}{2}\times1{,}0\times10^3\times(1{,}0^2-(4{,}5\times10^{-1})^2)$$
$$+1{,}0\times10^3\times9{,}81\times(6{,}5-3{,}0)$$
$$=1{,}3\times10^5\ \text{Pa}$$

20 **1.** $P+\frac{1}{2}\rho\cdot v^2+\rho\cdot g\cdot z=\text{constante}$

P est la pression du fluide (en Pa) ; ρ est la masse volumique du fluide (en $kg\cdot m^{-3}$) ; v est la vitesse du fluide (en $m\cdot s^{-1}$) ; g est l'intensité de pesanteur (en $N\cdot kg^{-1}$) et z l'altitude (en m).

2. Les trois termes de l'égalité de la relation de Bernoulli ont la même unité :

P est en :

$Pa = N\cdot m^{-2} = kg\cdot m\cdot s^{-2}\cdot m^{-2} = kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-2}$

$\rho\cdot v^2$ est en $kg\cdot m^{-3}\cdot m^2\cdot s^{-2} = kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-2}$

$\rho\cdot g\cdot z$ est en :

$kg\cdot m^{-3}\cdot N\cdot kg^{-1}\cdot m$

$= kg\cdot m^{-3}\cdot kg\cdot m\cdot s^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot m$

$= kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-2}$.

21 $v=\frac{Q}{S}$. Si Q et S sont constants, alors v est constant. Ainsi, ici, $v_A=v_B$.

$$P_B=P_A+\frac{1}{2}\rho({v_A}^2-{v_B}^2)+\rho\cdot g(z_A-z_B)$$
$$=P_A+\rho\cdot g(z_A-z_B)$$
$$P_B=3{,}5\times10^5+784\times9{,}81\times(0{,}5-4{,}5)$$
$$=3{,}2\times10^5\ \text{Pa}=3{,}2\ \text{bar}$$

22 **1.** D'après le principe de Venturi, pour un écoulement en régime permanent, la pression P d'un fluide diminue lorsque sa vitesse v augmente : puisque $P_B<P_A$ (d'après les valeurs fournies dans l'énoncé), on en déduit que $v_B>v_A$. C'est donc à travers la section S_B que la vitesse est la plus élevée.

2. a. Les deux points notés A et B sont situés sur la même ligne de courant et possèdent la même altitude $z_A=z_B$. La relation de Bernoulli :

$$P_A+\frac{1}{2}\rho\cdot v_A^2+\rho\cdot g\cdot z_A=P_B+\frac{1}{2}\rho\cdot v_B^2+\rho\cdot g\cdot z_B$$

s'écrit donc :

$$P_A+\frac{1}{2}\rho\cdot v_A^2=P_B+\frac{1}{2}\rho\cdot v_B^2.$$

b. D'après la relation précédente,

$$v_B=\sqrt{\frac{2(P_A-P_B)}{\rho}+v_A^2}.$$

AN :

$$v_B=\sqrt{\frac{2\times(1\,002\times10^2-987\times10^2)}{825}+4{,}5^2}$$
$$=4{,}9\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Ce résultat valide la réponse à la question **1** : $v_B>v_A$.

23 La portance est une illustration de l'effet Venturi. Elle provient de la forme particulière de l'aile d'un avion. L'air parcourt une distance plus grande sur la face supérieure de l'aile. Le temps de parcours restant le même, la vitesse de l'air y est alors plus grande et la pression de l'air diminue. L'aile de l'avion est aspirée vers le haut. Cette action est modélisée par une force nommée « portance ».
De même, lorsqu'une balle est placée dans un flux d'air incliné, le trajet parcouru par l'air est plus important sur la face supérieure et la vitesse de l'air y est aussi plus grande.

24 **1.** En régime permanent, la pression P d'un fluide diminue lorsque sa vitesse v augmente. Or, lorsque deux véhicules se déplaçant dans l'air se rapprochent l'un de l'autre, l'aire S de la section qui les sépare diminue. Le débit étant constant ($v=\frac{Q}{S}$), la vitesse de l'air traversant une section située entre les deux véhicules augmente. La baisse de pression se traduit par des forces pressantes modélisant l'action de l'air sur les véhicules moins intenses : les véhicules ont tendance à se rapprocher l'un de l'autre.

2. Il s'agit de l'effet Venturi.

25 **1. a.** D'après le sens de rotation de la balle, l'air est le plus rapide sur la face inférieure.
b. La pression de l'air est la plus grande sur la face supérieure.

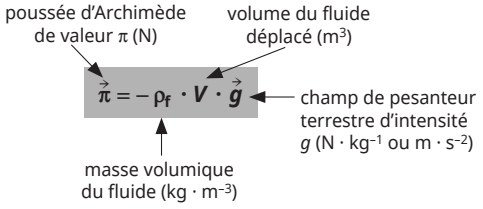
2. a. La résultante des forces pressantes est alors verticale et orientée vers le bas.
b. Le mouvement de la balle est alors curviligne (orienté vers le bas).

Faire le point avant d'aller plus loin p. 354

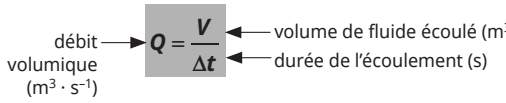
◗ ***Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède.***

Les forces pressantes qui modélisent les actions mécaniques d'un fluide sur la surface d'un objet immergé ne se compensent pas parfaitement : elles sont plus intenses sur le bas de l'objet que sur le haut. Il en résulte une action mécanique modélisée par une force verticale et orientée vers le haut : la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$.

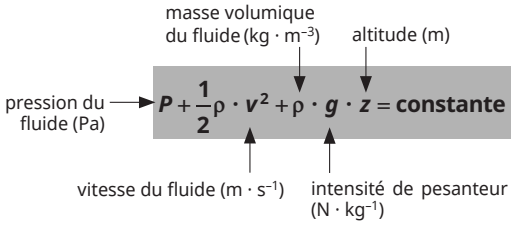
◗ ***Écrire l'expression de la poussée d'Archimède en explicitant chaque grandeur et son unité.***



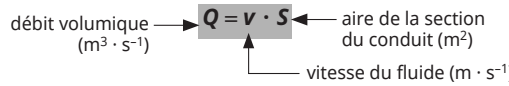
◗ ***Définir le débit volumique d'un fluide en régime permanent.***



◗ ***Nommer chaque grandeur de la relation de Bernoulli $P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$ et donner son unité.***



◗ ***Écrire la relation liant le débit volumique d'un fluide et sa vitesse d'écoulement en explicitant chaque grandeur et son unité.***



◗ ***Effectuer le bilan des actions mécaniques qui agissent sur un corps immobile immergé dans un fluide.***

Un corps immergé dans un fluide est soumis à l'action de la Terre et celle du fluide modélisées respectivement par le poids $\vec{P}$ du corps et la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ du fluide. $\vec{P}$ est vertical et dirigé vers la Terre ; la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ est verticale orientée vers le haut.

◗ ***Expliquer comment déterminer la vitesse d'un fluide à partir de la conservation du débit volumique en régime permanent.***

En régime permanent, il y a conservation du débit volumique Q d'un fluide incompressible le long d'un écoulement donc, en tous points A et B d'un écoulement, on a $Q_{(A)} = Q_{(B)}$ soit :

$$v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B \quad \text{et} \quad v_B = \frac{S_A}{S_B} \cdot v_A$$

◗ ***Expliquer pourquoi, lors de l'écoulement d'un fluide en régime permanent, si $S_B < S_A$, alors $v_B > v_A$.***

Il y a conservation du débit volumique Q d'un fluide incompressible le long d'un écoulement donc, en tous points A et B d'un écoulement, on a $Q_{(A)} = Q_{(B)}$ soit $v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$.

La vitesse v du fluide et l'aire S de la section traversée sont deux grandeurs inversement proportionnelles : $\frac{v_B}{v_A} = \frac{S_A}{S_B}$.

Si $S_A > S_B$, alors $v_B > v_A$. La vitesse du fluide augmente lorsque la section du conduit rétrécit.

Exercices similaires aux exercices résolus p. 355 et 356

27 **1. a.** Lorsque le ludion est en équilibre au sein du fluide (l'eau), son poids et la poussée d'Archimède qui modélisent l'action de la Terre et du fluide se compensent : $\vec{\pi} + \vec{P} = \vec{0}$.

En choisissant un axe vertical orienté vers le haut il vient par projection :

$\pi - P = 0$ soit $\pi = P$

D'où : $m_L \cdot g = \rho_{eau} (V_A + V_B) \cdot g$ soit $V_A = \frac{m_L}{\rho_{eau}} - V_B$.

b. Il faut convertir la masse m_L en kg.

$V_A = \frac{6{,}8 \times 10^{-3}}{1\,000} - 1{,}8 \times 10^{-6} = 5{,}0 \times 10^{-6}$ m³ = 5,0 cm³.

2. a. Le volume d'air V_A contenu dans le ludion diminue après compression de la membrane.

b. Si V_A diminue, alors la valeur de la poussée d'Archimède ($\pi = \rho_{eau} \cdot (V_A + V_B) \cdot g$) diminue et devient inférieure au poids P du ludion. Ainsi, l'équilibre est rompu et le ludion entame un mouvement vertical vers le bas.

29 **1. a.** On utilise la définition du débit volumique Q en régime permanant : $Q = v \cdot S$.

Ainsi : $v = \dfrac{Q}{S}$. Le débit volumique Q est converti en $m^3 \cdot s^{-1}$ soit $Q = \dfrac{1}{60}\ m^3 \cdot s^{-1}$.

L'aire S de la section du tuyau est donnée par $S = \pi\dfrac{D^2}{4}$, où D désigne le diamètre du tuyau en m.

AN : $v_A = \dfrac{\dfrac{1}{60}}{\pi \times \dfrac{(25{,}0 \times 10^{-3})^2}{4}} = 3{,}4 \times 10^1\ m \cdot s^{-1}$

Notons B un point situé dans la canalisation sur la même ligne de courant que A. La conservation du débit volumique amène : $Q_A = Q_B$ soit $v_A = \dfrac{v_B \cdot S_B}{S_A}$.

Ainsi, si $S_A < S_B$ (ce qui est le cas ici car $D_B = 80$ mm $> D_A = 25$ mm, ce qui amène $S_B = 5{,}0 \times 10^{-3}\ m^2 > S_A = 5{,}0 \times 10^{-4}\ m^2$) alors $v_A > v_B$.

b. Au sommet du jet, la valeur de la pression de l'eau est égale à celle de la pression atmosphérique, soit $P_{atm} = 1\,013$ hPa, et sa vitesse est nulle.

2. a. $P_A + \dfrac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_S + \dfrac{1}{2}\rho \cdot v_S^2 + \rho \cdot g \cdot z_S$, où S désigne un point situé au sommet du jet d'eau et situé sur la même ligne de courant que le point A.

b. On choisit l'origine des altitudes z au niveau du point A de la tuyère : $z_A = 0$ m.

De plus $v_S = 0\ m \cdot s^{-1}$, $P_S = P_{atm}$, $P_A = P_{atm}$ et $z_S = h$.

Ainsi il vient :

$P_{atm} + \dfrac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 = P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$, donc $h = \dfrac{v_A^2}{2g}$.

AN : $h = \dfrac{(3{,}4 \times 10^1)^2}{2 \times 9{,}8} = 5{,}9 \times 10^1$ m

c. Le raisonnement précédent est réalisé en négligeant les frottements de l'air qui agissent sur le jet d'eau.

d. L'altitude h atteinte par le jet d'eau peut augmenter si v_A augmente : $h = \dfrac{{v_A}^2}{2g}$.

Pour cela, il faut réduire le diamètre de la tuyère pour augmenter la vitesse d'éjection de l'eau :

$v_A = \dfrac{Q}{S_A}$.

S'entraîner pour maîtriser p. 357

30 **1. a.** $P = m \cdot g$ et $\pi = \rho \cdot V \cdot g$.

AN : $P = 85 \times 9{,}8 = 8{,}3 \times 10^2$ N

$\pi = 998 \times 90 \times 10^{-3} \times 9{,}8 = 8{,}8 \times 10^2$ N

b. La poussée d'Archimède modélise l'action du fluide sur le plongeur immergé. Le poids modélise l'action attractive de la Terre sur le plongeur immergé.

c. D'après les valeurs calculées précédemment dans le cas où le plongeur est complètement immergé : $\pi > P$. La poussée d'Archimède (verticale vers le haut) l'emporte sur le poids (vertical vers le bas). Le plongeur se maintient en surface.

À l'équilibre, la valeur de la poussée d'Archimède π compense la valeur du poids P soit :

$P = \pi = \rho \cdot V_{immergé} \cdot g$

$V_{immergé} = \dfrac{P}{\rho \cdot g}$

AN : $V_{immergé} = \dfrac{833}{998 \times 9{,}8} = 8{,}5 \times 10^{-2}\ m^3 = 85$ L

2. Pour que le plongeur se mette en mouvement vers le haut, il faut que $\pi > P$, alors :

$V_{immergé} > \dfrac{m \cdot g}{\rho \cdot g} = \dfrac{m}{\rho} = \dfrac{92}{998} = 9{,}2 \times 10^{-2}\ m^3 = 92$ L.

Il doit introduire un volume supérieur à 92 L d'air dans son gilet.

31 **1. a.** $Q = v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$ donc :

$v_B = v_A \cdot \dfrac{S_A}{S_B}$

b. $\dfrac{S_A}{S_B} = \dfrac{10}{7{,}0 \times 10^{-2}} = 1{,}4 \times 10^2$

D'où $v_B = 140 \times v_A$.

La vitesse v_A peut être négligée par rapport à v_B et considérée comme quasiment nulle.

2. a.

$P_A + \dfrac{1}{2}\rho \cdot {v_A}^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \dfrac{1}{2}\rho \cdot {v_B}^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$

b. $P_A = P_B = P_{atm}$ et $v_A = 0$, donc la relation précédente s'écrit :

$\rho \cdot g \cdot z_A = \dfrac{1}{2}\rho \cdot {v_B}^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$.

$z_A - z_B = h$, donc $\rho \cdot g \cdot h = \dfrac{1}{2}\rho \cdot {v_B}^2$ et il vient :

$v_B = \sqrt{2g \cdot h}$

$v_B = \sqrt{2g \cdot h}$

AN : $v_B = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 5{,}5} = 1{,}0 \times 10^1\ m \cdot s^{-1}$

c. $Q = v \cdot S$

AN : $Q = 1{,}0 \times 10^1 \times 7{,}0 \times 10^{-2} = 7{,}3 \times 10^{-1}\ m^3 \cdot s^{-1}$

32 **› Démarche experte**

D'après la loi fondamentale de la statique des fluides :

$P_A = P_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot z_A$ et $P_B = P_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot z_B$

$P_A < P_B$ car $z_A < z_B$.

La force pressante $\vec{F}_A$ qui modélise l'action du fluide sur la surface supérieure du cube est donc moins intense que la force pressante $\vec{F}_B$ qui modélise l'action du fluide sur la surface inférieure. En revanche, les forces pressantes qui modélisent les actions du fluide sur les quatre faces verticales du cube ont même direction (horizontale), même valeur ($F = P \cdot S$) mais sont de sens opposés. Elles se compensent.

$\vec{F}_A = -P_A \cdot S \cdot \vec{k}$ et $\vec{F}_B = P_B \cdot S \cdot \vec{k}$

La résultante des forces qui modélisent les actions mécaniques du fluide sur les surfaces du cube s'écrit donc :

$\sum \vec{F} = \vec{F}_A - \vec{F}_B = (P_B - P_A) \cdot S \cdot \vec{k}$

$= \rho_f \cdot g \cdot h \cdot S \cdot \vec{k} = \rho_f \cdot g \cdot V \cdot \vec{k}$

$\sum \vec{F} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g} = \vec{\pi}$. La poussée d'Archimède est la résultante des forces qui modélisent les actions mécaniques du fluide sur la surface du cube.

› Démarche avancée

1. a. $P_A = P_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot z_A < P_B = P_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot z_B$

$\vec{F}_A = -P_A \cdot S \cdot \vec{k}$ et $\vec{F}_B = P_B \cdot S \cdot \vec{k}$

b. À une altitude z donnée, les forces pressantes qui modélisent les actions du fluide sur les quatre faces verticales du cube ont même direction (horizontale), même valeur ($F = P \cdot S$) mais sont de sens opposés. Elles se compensent.

2. a. $F_B - F_A = (P_B - P_A) \cdot S$

$(P_B - P_A) = P_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot z_B - P_{atm} + \rho_f \cdot g \cdot z_B$

$= \rho_f \cdot g \cdot (z_B - z_A) = \rho_f \cdot g \cdot h$

$F_B - F_A = \rho_f \cdot g \cdot h \cdot S$

b. $\sum \vec{F} = \vec{F}_A - \vec{F}_B = (P_B - P_A) \cdot S \cdot \vec{k}$

$= \rho_f \cdot g \cdot h \cdot S \cdot \vec{k} = \rho_f \cdot g \cdot V \cdot \vec{k}$.

$\sum \vec{F} = \rho_f \cdot g \cdot V \cdot \vec{k}$. La poussée d'Archimède est la résultante des forces qui modélisent les actions mécaniques du fluide sur la surface du cube.

$\vec{P} = m_f \cdot \vec{g} = \rho_f \cdot V \cdot \vec{g} = -\rho_f \cdot g \cdot V \cdot \vec{k} = -\vec{\pi}$

La poussée d'Archimède est la force opposée (de même direction, de même valeur mais de sens opposé) au poids du volume de fluide déplacé.

33 ***Ballon d'hélium***

Un ballon météorologique gonflé à l'hélium doit embarquer dans l'atmosphère un ensemble de capteurs. Sa masse est de 500 g.

1. *Calculer la masse volumique de l'hélium et celle de l'air.*

2. *Quel doit être le volume minimal du ballon pour s'élever ?*

1. $\rho_{He} = \dfrac{M_{He}}{V_M}$

AN : $\rho_{He} = \dfrac{4,0}{22,4} = 1,8 \times 10^{-1}\ g \cdot L^{-1}$

$= 1,8 \times 10^{-1}\ kg \cdot m^{-3}$

$\rho_{air} = \dfrac{0,80 \times M_{N_2} + 0,20 \times M_{O_2}}{V_M}$

AN : $\rho_{air} = \dfrac{0,80 \times 14,0 \times 2 + 0,20 \times 16,0 \times 2}{22,4}$

$= 1,29\ g \cdot L^{-1} = 1,29\ kg \cdot m^{-3}$

2. La valeur de la poussée d'Archimède doit être supérieure au poids du ballon pour permettre son décollage :

$\pi = \rho_{air} \cdot V \cdot g > P = m \cdot g + \rho_{He} \cdot V \cdot g$.

Il vient :

$\rho_{air} \cdot V \cdot g - \rho_{He} \cdot V \cdot g > m \cdot g$

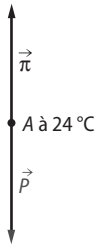
$V > \dfrac{m}{\rho_{air} - \rho_{He}}$

AN : $V > \dfrac{500 \times 10^{-3}}{1,29 - 0,18} = 4,5 \times 10^{-1}\ m^3 = 450\ L$

34 **1. a.** Chaque sphère est soumise à l'action de la Terre et à celle du fluide, modélisées respectivement par son poids et de la poussée d'Archimède. Le poids $\vec{P}$ est vertical vers le bas et la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ est verticale vers le haut.

$\vec{P} = -m_A \cdot g \cdot \vec{k} = -\rho_A \cdot g \cdot V \cdot \vec{k}$

et $\vec{\pi} = \rho_{eau} \cdot g \cdot V \cdot \vec{k}$



b. D'après le principe d'inertie (1re loi de Newton), dans le référentiel de l'éprouvette, la sphère A est immobile si les deux forces se compensent : $\vec{P} + \vec{\pi} = \vec{0}$.

Par projection sur l'axe (*Oz*), l'équation vectorielle devient :

$-\rho_A \cdot g \cdot V + \rho_{eau} \cdot g \cdot V = 0$

ce qui amène $\rho_A = \rho_{eau}$ à 24 °C.

c. D'après l'énoncé, « la masse volumique du liquide dans la colonne décroît fortement lorsque la température augmente. » Pour des températures supérieures à 24 °C, ρ_{eau} diminue et devient inférieure à 997,38 kg · m^{-3} = ρ_A.

Le poids $P = \rho_A \cdot g \cdot V$ prédomine alors sur la poussée d'Archimède $\pi = \rho_{eau} \cdot g \cdot V$ et la sphère coule (son mouvement est rectiligne accéléré vers le bas).

2. a. Un raisonnement identique mené sur la sphère B amène $\rho_B = \rho_{eau}$ à 22 °C.

Pour la sphère B,

$\rho_B = \rho_{eau}$ à 22 °C est supérieure à ρ_{eau} à 24 °C.

À 24 °C, le poids $P = \rho_B \cdot g \cdot V$ prédomine alors sur la poussée d'Archimède $\pi = \rho_{eau} \cdot g \cdot V$ et la sphère reste en bas de l'éprouvette.

b. La sphère B s'élève dans l'éprouvette lorsque la poussée d'Archimède prédomine sur le poids, soit pour des masses volumiques $\rho_{eau} > \rho_B = \rho_{eau}$ à 22 °C. Cela se produit pour les températures $T < 22$ °C.

3. a. $\Delta m = m_B - m_A = \rho_B \cdot V - \rho_A \cdot V = (\rho_B - \rho_A) \cdot V$

AN : $\Delta m = (997{,}86 - 997{,}38) \times 2 \times 10^{-6} = 9{,}6 \times 10^{-7}$ kg

$= 0{,}96$ mg ≈ 1 mg.

Une huile minérale possède une masse volumique qui décroît plus fortement que celle de l'eau lorsque la température augmente. Une différence de masse de 1 mg entre deux sphères correspond à des températures plus proches. Cela permet de graduer plus finement le thermomètre, ce qui augmente sa précision.

b. 22 °C $\leqslant T \leqslant$ 24 °C soit T = 23 °C avec une incertitude-type de 1 °C.

35 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur. Sur l'axe horizontal, v^2 doit être exprimé en 10^3 m^2 · s^{-2}. Cette erreur a été rectifiée dans le manuel de l'élève et dans les manuels numériques.*

1. On utilise les relations définissant le débit volumique Q :

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = S \cdot v, \text{ donc } v = \frac{V}{S \cdot \Delta t}$$

$$\textbf{AN :}\ v = \frac{25}{\pi \times \frac{(200 \times 10^{-3})^2}{4} \times 10 \times 60} = 1{,}3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. a. Une fonction affine permet de modéliser ces mesures.

b. L'ordonnée à l'origine correspond à la pression du fluide au repos : P = 1 021 hPa.

c. La relation de Bernoulli s'écrit :

$$P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante 1.}$$

Pour une gaine horizontale, z est constant et la relation devient :

$$P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 = \text{constante 2}$$

Notons k la constante 2 :

$$P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 = \text{k, soit } P = \text{k} - \frac{1}{2}\rho \cdot v^2.$$

$P = f(v^2)$ correspond bien à l'équation d'une fonction affine décroissante et de coefficient directeur égal à $-\frac{1}{2}\rho$.

Ici, le coefficient directeur vaut environ :

$$\frac{(1\,000 - 1\,020) \times 10^2}{3 \times 10^3} = -0{,}67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$-\frac{1}{2}\rho = -0{,}67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ soit } \rho = 1{,}34 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Ce résultat est cohérent avec la valeur de la masse volumique de l'air :

$\rho_{air} = 1{,}3$ kg · m^{-3} à 0 °C

36 Exemple d'exposé oral

Le volume d'un sous-marin étant constant, la **poussée d'Archimède** qu'il subit l'est également.

Lorsqu'on souhaite descendre le sous-marin, il faut donc augmenter son **poids**. On remplace alors l'air remplissant sa double paroi extérieure par de l'eau, ce qui fait augmenter la **masse volumique** moyenne du sous-marin à une valeur supérieure à celle de l'eau : la masse du sous-marin devient alors supérieure à celle du volume d'eau déplacé et la **résultante des forces** qui modélisent les actions exercées sur le sous-marin est alors verticale et dirigée vers le bas. Le sous-marin immobile se met en **mouvement** et descend (son vecteur vitesse varie dans la direction et le sens de la résultante des forces).

Inversement, lorsqu'on souhaite monter à la surface, il faut remplacer l'eau dans la double paroi par de l'air (contenu dans des réservoirs à air comprimé à bord du sous-marin).

Pour rester entre deux eaux ou se déplacer verticalement à vitesse constante, on remplit la double paroi d'eau (ou d'air) pour que la valeur du poids du sous-marin soit exactement égale à celle de la poussée d'Archimède. Dans ce cas, la masse volumique du sous-marin est égale à celle de l'eau.

37 Exemple d'exposé oral

Dans le cas d'une formule 1 ou E, on cherche à créer une dépression sous le véhicule pour favoriser

son adhérence à la route. La section du fond plat du véhicule permettant l'écoulement de l'air sous la voiture est réduite afin d'augmenter la vitesse d'écoulement. Par effet Venturi (loi de Bernoulli), la pression de l'air sous le véhicule est alors plus faible que celle de l'air circulant au-dessus. Cette différence de pression est à l'origine d'une action mécanique de l'air qui pousse le véhicule vers le sol.

Développer ses compétences p. 359

38 › Questions préliminaires

1. D'après le doc. 1, le rayon moyen de la montgolfière peut être estimé à 8 m (d'après la taille d'une personne dans la nacelle estimée à 1,8 m) :

$V_{\text{montgolfière}} = \frac{4}{3} \times \pi \times 8^3 = 2{,}1 \times 10^3 \text{ m}^3$

2.

3. D'après le doc. 2, par lecture graphique, à 15 °C (soit 288 K), $\rho_{\text{air}} = 1{,}21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

› Le problème à résoudre

Une montgolfière aura un mouvement vertical dirigé vers le haut dès lors que l'action mécanique de l'air atmosphérique modélisée par la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ devient supérieure à l'action mécanique de la Terre modélisée par le poids $\vec{P}$ de la montgolfière.

À l'équilibre : $\vec{\pi} + \vec{P} = \vec{0}$.

Sur un axe vertical dirigé vers le haut : $\pi - P = 0$.

$\rho_{\text{air atmosphérique}} \cdot V_b \cdot g$

$- (m_m + m_{\text{passagers}} + \rho_{\text{air chaud}} \cdot V_b) \cdot g = 0$

$$\rho_{\text{air chaud}} = \rho_{\text{air atmosphérique}} - \frac{m_m + m_{\text{passagers}}}{V_b}$$

$$\rho_{\text{air chaud}} = 1{,}21 - \frac{300 + 3 \times 75}{2\,100} = 0{,}96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Par lecture graphique : $\rho_{\text{air chaud}} = 0{,}96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à une température $T \approx 360$ K, soit $\theta \approx 87$ °C ;

39 › Questions préliminaires

1. À l'instant du décollage, la force de poussée F est l'équivalent du double de la force pressante modélisant l'action de l'eau sur la surface de la tuyère : $F = 2\,P \cdot S$.

AN : $F = 2 \times 6{,}0 \times 10^5 \times \pi \times \frac{(2{,}0 \times 10^{-2})^2}{4}$

$= 3{,}8 \times 10^2$ N

Cette force est nettement supérieure au poids P de la fusée :

AN :

$$P = (100 \times 10^{-3} + 10 \times 10^{-2} \times \pi \times \frac{(8{,}5 \times 10^{-2})^2}{4} \times 1\,000) \times 9{,}81 = 6{,}5 \text{ N}$$

2. $Q = v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$ donc $v_A = \frac{v_B \cdot S_B}{S_A}$.

S_A et S_B désignent respectivement l'aire d'une section de la tuyère et de la bouteille, v_A et v_B la vitesse de l'eau à la sortie de la tuyère et de la bouteille.

$$S_A = \pi \times \frac{(2{,}0 \times 10^{-2})^2}{4} = 3{,}1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S_B = \pi \times \frac{(8{,}5 \times 10^{-2})^2}{4} = 5{,}7 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$S_A < S_B$ donc $v_B > v_A$.

$S_B / S_A = 18$ donc $v_A = 18 v_B$.

La vitesse v_A est 18 fois plus importante que v_B.

L'écoulement de l'eau dans le réservoir (v_B) s'effectue donc à une vitesse négligeable devant celle d'éjection par la tuyère.

› Le problème à résoudre

• *Calcul de la vitesse du fluide éjecté :*

$v_A = v_{\text{fluide éjecté}}$ peut être obtenu par application de la relation de Bernoulli :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot {v_A}^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot {v_B}^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$$

$P_A = P_{\text{atm}} = 1\,000$ hPa

$P_B = 6{,}0$ bar $= 6{,}0 \times 10^5$ Pa

$v_B \approx 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$z_B - z_A = 10$ cm

La relation de Bernoulli s'écrit :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot {v_A}^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \rho \cdot g \cdot z_B$$

$$v_A = \sqrt{\frac{2(P_B - P_A)}{\rho} + 2g(z_B - z_A)}$$

AN :

$$v_A = \sqrt{\frac{2 \times (6{,}0 \times 10^5 - 1{,}0 \times 10^5)}{1\,000} + 2 \times 9{,}81 \times (10 \times 10^{-2})}$$

$v_A = 3{,}2 \times 10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

• *Calcul du volume de fluide éjecté après 10 ms :*

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = v_A \cdot S_A$$

$V = v_A \cdot S_A \cdot \Delta t$

AN : $\Delta t = 10$ ms, $v_A = 3{,}2 \times 10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $S_A = 3{,}1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

$V = 3{,}2\times10^{1}\times3{,}1\times10^{-4}\times10\times10^{-3} = 9{,}6\times10^{-5}$ m^3

• *Calcul de la vitesse de la fusée après 10 ms :*

$$v_{\text{fusée}} = \frac{m_{\text{fluide éjecté}}}{m_{\text{fusée}}}\cdot v_{\text{fluide éjecté}}$$

$$m_{\text{fusée}} = 100\times10^{-3} + 10\times10^{-2}\times\pi\times\frac{(8{,}5\times10^{-2})^2}{4}\times1\,000$$
$$= 6{,}7\times10^{-1}\text{ kg}$$

$$v_{\text{fusée}} = \frac{9{,}6\times10^{-5}\times1\,000}{6{,}7\times10^{-1}}\times3{,}2\times10^{1}$$
$$= 4{,}6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = 17\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$$

40 › Questions préliminaires

a. En régime permanent, le débit volumique sanguin reste constant.

b. La vitesse d'écoulement du sang dans l'artère diminue au niveau de l'anévrisme (si $S_A > S_B$ alors $v_B > v_A$). La vitesse du fluide augmente lorsque la section du conduit rétrécit.

c. La pression sanguine augmente au niveau de l'anévrisme. D'après le principe de Venturi, pour un écoulement en régime permanent, la pression P d'un fluide diminue lorsque sa vitesse v augmente : si $v_B > v_A$, alors $P_B < P_A$.

› Le problème à résoudre

$Q = 5{,}0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1} = (5{,}0\times10^{-3})/60$
$= 8{,}3\times10^{-5}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

D'après la relation définissant le débit volumique : $v = \frac{Q}{S}$.

À l'aide de l'indication du schéma (diamètre de l'aorte de 2 cm), on peut estimer celui de anévrisme à environ 5 cm.

$v_{\text{aorte}} = \frac{Q}{S_{\text{aorte}}}$ et $v_{\text{anévrisme}} = \frac{Q}{S_{\text{anévrisme}}}$ avec $S = \pi\frac{D^2}{4}$.

AN : $v_{\text{aorte}} = \frac{8{,}3\times10^{-5}}{\pi\times\frac{(2\times10^{-2})^2}{4}} = 2{,}7\times10^{-1}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et

$v_{\text{anévrisme}} = 4{,}2\times10^{-2}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La vitesse du sang diminue.

En appliquant la relation de Bernoulli :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho\cdot v_A^2 + \rho\cdot g\cdot z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho\cdot v_B^2 + \rho\cdot g\cdot z_B$$

on peut écrire :

$$P_B = P_A + \frac{1}{2}\rho(v_A^2 - v_B^2) + \rho\cdot g(z_A - z_B)$$

AN : On prend $v_A = 2{,}7\times10^{-1}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $v_B = 4{,}2\times10^{-2}$ m^2 et $(z_A - z_B) \approx 10$ cm.

On convertit P_A en pascal :

$P_A = 9{,}3\times10^{1}\times133{,}3 = 1{,}24\times10^{4}$ Pa

$$P_B = 1{,}24\times10^{4} + \frac{1}{2}\times1\,061\times((2{,}7\times10^{-1})^2 - (4{,}2\times10^{-2})^2)$$
$$+ 1\,061\times9{,}81\times10\times10^{-2}$$

$P_B = 1{,}35\times10^{4}$ Pa $= 10{,}1$ cmHg

La pression sanguine augmente au niveau de l'anévrisme de 9,3 cmHg à 10,1 cmHg.

41 1. a. La relation de Bernoulli appliquée à la ligne de courant O'B s'écrit :

$$P_0' + \frac{1}{2}\rho\cdot v_0'^2 + \rho\cdot g\cdot z_0' = P_B + \frac{1}{2}\rho\cdot v_B^2 + \rho\cdot g\cdot z_B$$

Comme la vitesse v de l'air a la même valeur en tout point d'une section droite d'un tube de courant ($v_0 = v_0'$) et comme la différence d'altitude entre B, O et O' est négligeable ($z_0' = z_B = z_0$), il vient : $P_0 = P_B$.

La relation de Bernoulli appliquée à la ligne de courant OA s'écrit :

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho\cdot v_0^2 + \rho\cdot g\cdot z_0 = P_A + \frac{1}{2}\rho\cdot v_A^2 + \rho\cdot g\cdot z_A$$

Comme A est un point d'arrêt du fluide ($v_A = 0$) et comme A et O sont à la même altitude ($z_0 = z_A$) alors il vient : $\frac{1}{2}\rho\cdot v_0^2 = P_A - P_0$.

b. $\frac{1}{2}\rho\cdot v_0^2 = P_A - P_0$ et $P_0 = P_B$ soit :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2(P_A - P_B)}{\rho_{\text{air}}}}$$

2. La loi fondamentale de la statique des fluides appliquée à l'eau contenue dans le tube en U amène : $P_A - P_B = \rho_{\text{eau}}\cdot g\cdot h$.

3. $v_0 = \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{eau}}\cdot g\cdot h)}{\rho_{air}}}$ soit :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\times(998{,}29\times9{,}78\times1)}{0{,}413}} = 217{,}4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$
$$= 782{,}8\text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \approx 8\times10^{2}\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}.$$

POUR PRÉPARER L'ECE *p. 362*

1. Proposition de protocole expérimental

• Ouvrir la vidéo « Décollage d'un ballon sonde » avec le logiciel de pointage.

• Choisir un axe vertical (Oz) orienté vers le haut.

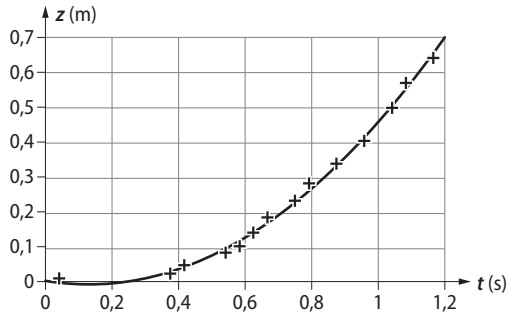
• Déterminer l'image correspondant au début de l'ascension et lui attribuer la date $t = 0$ s.

• Étalonner le document vidéo en utilisant le rayon du ballon fourni dans le doc. 2.

• Choisir un point du ballon et effectuer le pointage image par image de sa position au cours de l'ascension.
• Transférer les valeurs du pointage de l'altitude en fonction du temps dans le tableur-grapheur.
• Modéliser la courbe représentant l'altitude en fonction du temps $z = f(t)$ par une fonction parabolique du type $z = k \cdot t^2 + b \cdot t + c$.
• Déterminer la valeur de $a = 2k$ à partir de la modélisation, accompagnée de son incertitude-type $u(a)$.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental proposé

Voici la courbe obtenue :



$z = c + b \cdot t + k \cdot t^2$
$c = (5 \pm 21)$ mm
$b = (-167 \pm 71)$ mm · s^{-1}
$k = (619 \pm 58)$ mm · s^{-2}

En comparant l'équation du modèle :

$$z(t) = \frac{1}{2}a \cdot t^2 + b \cdot t + c$$

avec la modélisation obtenue, on a par exemple $a = 2k = 1\,238$ mm · s^{-2} avec $u(a) = 116$ mm · s^{-2}.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. $\pi = m(a + g)$

AN : $\pi = 4{,}7 \times 10^{-3} \times (1{,}238 + 9{,}8) = 5{,}2 \times 10^{-2}$ N

$$\frac{u(\pi)}{\pi} = \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2}$$

AN : $\dfrac{u(\pi)}{\pi} = \sqrt{\left(\dfrac{0{,}1}{4{,}7}\right)^2 + \left(\dfrac{116}{1238}\right)^2} = 0{,}096$

Soit $u(\pi) = 0{,}5 \times 10^{-2}$ N.

D'où : $4{,}7 \times 10^{-2}$ N $\leqslant \pi \leqslant 5{,}7 \times 10^{-2}$ N

2. D'après l'expression vectorielle : $\pi = \rho \cdot V \cdot g$.

AN : $\pi = 1{,}2 \times 4{,}2 \times 10^{-3} \times 9{,}8 = 4{,}9 \times 10^{-2}$ N

Avec la valeur de la poussée d'Archimède déterminée, on vérifie que l'écart entre les deux valeurs est faible.

3. Les quelques sources d'erreurs possibles sont :
– la qualité de la vidéo ;
– le choix du point du ballon ;
– le pointage délicat ;
– l'incertitude sur l'étalonnage, etc.

CHAPITRE 15

Modèle du gaz parfait

Manuel, p. 376

LE PROGRAMME

1. Décrire un système thermodynamique : exemple du modèle du gaz parfait

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression. Équation d'état du gaz parfait.	Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 376

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves font le lien entre les grandeurs macroscopiques de description d'un fluide et le comportement microscopique de ses particules.

› Exemple de réponse attendue

Au soleil, la température de l'hélium dans le ballon augmente. À l'échelle microscopique, cela se traduit par une augmentation de l'agitation des particules. Celles-ci frappent alors plus fréquemment les parois à l'intérieur du ballon : la pression de l'hélium à l'intérieur augmente. Lorsqu'elle devient trop importante (par rapport à la pression atmosphérique à l'extérieur du ballon), le ballon éclate.
Remarque : la masse volumique de l'hélium reste constante (le nombre de particules et le volume qu'elles occupent restent les mêmes).

› En classe de Terminale

Dans l'**activité 1**, présentée sous forme d'activité de découverte en classe inversée, les élèves seront amenés à faire le lien entre les valeurs des grandeurs macroscopiques et les propriétés d'un gaz à l'échelle microscopique. Cela permettra une première approche qualitative de l'équation d'état décrivant le comportement d'un gaz parfait.

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves maîtrisent la loi de Mariotte, vue en enseignement de spécialité de Première.

› Exemple de réponse attendue

À température constante, pour la quantité d'hélium considérée, la loi de Mariotte s'écrit :

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \text{ soit } V_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_2}$$

AN : $V_2 = \frac{1{,}0 \times 3{,}0}{0{,}60} = 5{,}0 \text{ m}^3$

› En classe de Terminale

Dans l'**activité 3**, présentée sous forme de démarche d'investigation, les élèves seront amenés vérifier la loi de Mariotte pour un gaz réel. Ils devront comparer les résultats obtenus expérimentalement pour le gaz réel avec ceux attendus pour un gaz parfait. La comparaison permettra d'identifier les limites du modèle du gaz parfait.

SITUATION 3

Il s'agit ici de vérifier que les élèves connaissent la définition du volume molaire d'un gaz et les paramètres dont sa valeur dépend.

› Exemple de réponse attendue

Le volume molaire d'un gaz ne dépend pas de sa nature mais uniquement de la température et de la pression. Dans les mêmes conditions de température et de pression, la valeur du volume molaire de l'hélium est donc la même que celle du dioxyde de carbone.
À 20 °C et 1 013 hPa, le volume molaire d'un gaz est : $V_m = \frac{V}{n}$.

AN : $V_m = \frac{48{,}1}{2{,}0} = 24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$

› En classe de Terminale

Dans l'**activité 2**, présentée sous forme de démarche expérimentale, les élèves seront amenés à étudier l'évolution de la pression d'un gaz réel en fonction de sa température. Ils pourront alors valider l'équation d'état du gaz parfait. Pour ce faire, ils devront, entre autres, déterminer la quantité de matière de gaz contenu dans un volume donné à partir de son volume molaire.

ACTIVITÉS

p. 378 ACTIVITÉ 1

Décrire le comportement d'un gaz

Commentaires pédagogiques

Dans la continuité de la première approche effectuée en classe de Première (programme de spécialité), cette activité, proposée en classe inversée, a pour objectif d'assoir les liens entre les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées et les propriétés microscopiques d'un gaz. Elle permet par ailleurs une première appropriation qualitative de l'équation d'état du gaz parfait. Les élèves sont amenés à modifier les valeurs de grandeurs macroscopiques d'un gaz (considéré parfait) et à observer le comportement de ses constituants microscopiques. L'exploitation et l'analyse des documents permettent de rappeler la signification microscopique de la pression d'un gaz (doc. 1, animation illustrant à l'échelle microscopique la relation entre la pression d'un gaz confiné dans un volume et le nombre de molécules) puis montre l'interdépendance entre les variables P, V, n et T (doc. 2, animation illustrant à l'échelle microscopique la loi du gaz parfait). L'élève est alors amené à proposer une justification qualitative de l'équation mathématique du modèle du gaz parfait.

Remarque : La situation 1 de la page d'ouverture du chapitre a permis de vérifier l'acquisition des liens entre les grandeurs macroscopiques de description d'un fluide (pression, température, masse volumique) et le comportement microscopique des entités qui le constituent.

› Exploitation et analyse

1. Plus la fréquence des chocs des constituants microscopiques d'un gaz sur une paroi est grande, plus la valeur de la pression P mesurée augmente. Ainsi, par exemple, pour un volume de gaz donné, plus les molécules sont rapides et/ou nombreuses, plus la pression mesurée est importante.

Plus le degré d'agitation des constituants microscopiques d'un gaz est important, plus la valeur de la température T mesurée augmente. Ainsi, par exemple, pour un volume de gaz donné, plus les molécules sont rapides, plus la température mesurée est importante

Plus le nombre (la quantité de matière n) et/ou la masse des constituants microscopiques d'un gaz par unité de volume est (sont) elevée(s), plus la valeur de la masse volumique ρ mesurée est grande. Ainsi, par exemple, pour un nombre de molécules donné, plus le volume total occupé par le gaz diminue, plus la masse volumique mesurée est importante.

› Synthèse

2. D'après les observations précédentes :

• pour une quantité de matière n et une température T constantes, la pression P d'un gaz est inversement proportionnelle au volume V du système, ce que la relation **b.** ne traduit pas.

• pour un volume V et une température T constants, la pression P d'un gaz est proportionnelle à la quantité de matière n du système, ce qui rend incohérente la relation **c.**

• pour un volume V et une quantité de matière n constants, la pression P d'un gaz est proportionnelle à la température T du système, ce que la relation **d.** ne traduit pas.

La relation **a.** est donc la seule qui soit cohérente.

p. 379 ACTIVITÉ 2

L'équation d'état du gaz parfait

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

L'activité présentée sous forme expérimentale a pour objectif de tester l'équation d'état du gaz parfait pour un volume d'air constant (loi de Gay-Lussac). L'élève est amené à effectuer des mesures au moyen d'un microcontrôleur. Il doit, dans un premier temps, adapter le programme proposé aux types de capteurs utilisés (en se basant sur les fonctions de transfert ou sur la sensibilité des capteurs mis en œuvre). L'exploitation des mesures le conduit par la suite à vérifier qu'il existe bien une relation de proportionnalité entre la pression et la température thermodynamique d'un volume de gaz constant, comme le prévoit le modèle du gaz parfait. L'activité permet également d'évoquer l'échelle de température absolue et la signification du zéro absolu.

Remarque : À défaut de microcontrôleur, l'activité peut être effectuée à l'aide d'un capteur de pression et d'une thermistance.

› Mesures

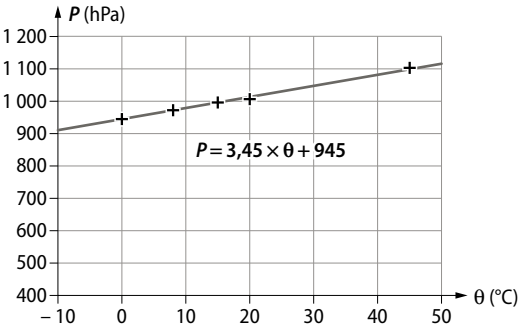
Deux exemples de programmes pour un montage utilisant les capteurs MPX5700GP et LM35DZ, et pour un montage utilisant le manomètre Pressio

et une thermistance CTN B57164, sont disponibles sur le site enseignant *espace-lycee.editions-bordas.fr* et sur le manuel numérique enseignant.
Exemple de mesures :

P (hPa)	θ (°C)
946,0	0
974,0	8
998,0	15
1 006	20
1 102	45

› Analyses

1. a. La représentation graphique $P = f(\theta)$ correspond à celle d'une fonction affine.

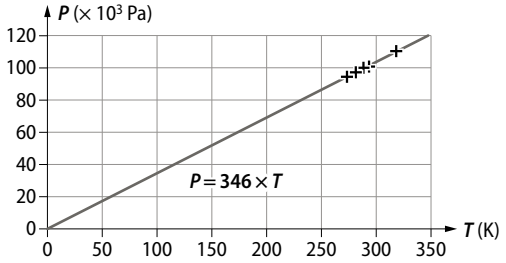


b. Pour $P = 0$ Pa, on trouve $\theta = -274$ °C.
À l'échelle microscopique, une pression nulle signifie qu'il n'y a plus aucun choc des molécules du gaz sur les parois du ballon. Les molécules sont donc immobiles. Il n'y a plus d'agitation thermique, c'est le zéro absolu. Il est théoriquement atteint pour $\theta = -274$ °C d'après les mesures réalisées.

2. a. La température thermodynamique est calculée par translation par rapport à l'échelle Celsius : $T = \theta + 273{,}15$.

P (hPa)	θ (°C)	T (en K)
946,0	0	273,1
974,0	8	281,1
998,0	15	288,1
1 006	20	293,1
1 102	45	318,1

La représentation graphique $P = f(T)$ correspond à celle d'une fonction linéaire.



b. Après modélisation par une fonction linéaire : $P = a \cdot t$ avec $a = (345{,}7 \pm 1{,}8)$ Pa · K^{-1}.

L'équation d'état du gaz parfait amène : $P = \dfrac{n \cdot R}{V} \cdot T$ donc a correspond au terme $\dfrac{n \cdot R}{V}$.

$n = \dfrac{V}{V_m}$ ou $n = \dfrac{\rho \cdot V}{M}$. Il vient :

$\dfrac{n \cdot R}{V} = \dfrac{R}{V_m}$ ou $\dfrac{n \cdot R}{V} = \dfrac{\rho \cdot R}{M}$ en kg · m^{-1} · s^{-2} · K^{-1}

$\dfrac{n \cdot R}{V} = 3{,}45 \times 10^2$ kg · m^{-1} · s^{-2} · K^{-1}

ou $\dfrac{n \cdot R}{V} = 3{,}44 \times 10^2$ kg · m^{-1} · s^{-2} · K^{-1}

› Conclusion

3. a. Dans les conditions de l'expérience, l'équation d'état du gaz parfait est vérifiée avec une bonne approximation : $P = a \cdot T$ avec un incertitude-type $u(a)$ associée au résultat faible. De plus, la valeur expérimentale du coefficient a est suffisamment proche de la valeur de référence. Le quotient $\dfrac{|a_{mes} - a_{ref}|}{u(a)}$, où $u(a)$ est l'incertitude-type associée au résultat, vaut : $\dfrac{|345{,}7 - 344{,}5|}{1{,}8} = 0{,}7$

b. La valeur du zéro absolu est définie théoriquement : $T = 0$ K ou $\theta = -273{,}15$ °C. Expérimentalement, la valeur obtenue est cohérente car proche de la valeur de référence : $\theta = -274$ °C.

p. 380 ACTIVITÉ 3

Estimer les limites du modèle du gaz parfait

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

L'activité, présentée sous forme de démarche d'investigation, consiste à comparer la valeur de la pression d'un gaz réel (ici, le dioxyde de carbone) avec celle obtenue par application du modèle du gaz parfait. L'élève est amené à constater que l'écart entre les deux valeurs augmente lorsque la pression du gaz s'accroît. Il peut alors proposer une

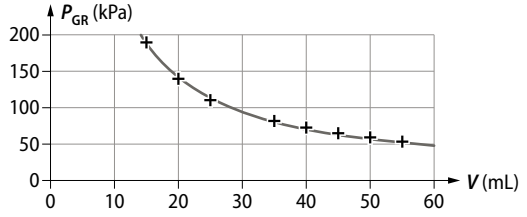
estimation de la limite du modèle du gaz parfait et en proposer une interprétation microscopique.
Remarque : la même étude peut être réalisée en parallèle avec de l'air.

› Pistes de résolution

1. Un volume de 30 mL de dioxyde de carbone est introduit dans une seringue à température de 20 °C. Le piston est déplacé suffisamment lentement pour considérer que la température est constante au cours des mesures. Une compression puis une détente du gaz amène les résultats de mesure suivants :

V (mL)	P_{GR} ($\times 10^3$ Pa)
15,00	193,0
20,00	142,0
25,00	112,0
30,00	96,00
35,00	83,00
40,00	74,00
45,00	66,00
50,00	60,00
55,00	54,00

2.



$P_{GR} = \dfrac{a}{V}$ avec $a = (2{,}88 \pm 0{,}04) \times 10^6$ Pa · mL^{-1}

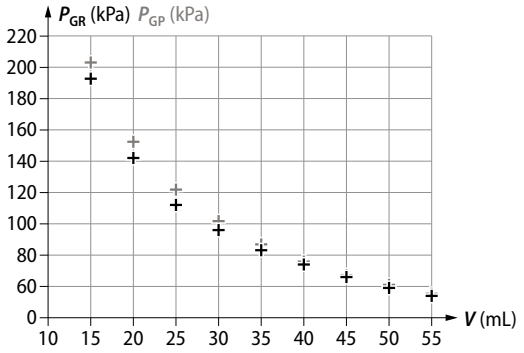
3. À partir de l'équation d'état du gaz parfait, il vient : $P_{GP} = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{V}$.

À la température de 20 °C, un volume de 30 mL de dioxyde de carbone contient :

$n = \dfrac{30 \times 10^{-3}}{24{,}1} = 1{,}25 \times 10^{-3}$ mol de gaz.

$P_{GP} = \dfrac{8{,}31 \times 1{,}25 \times 10^{-3} \times 293}{V \times 10^{-6}}$, avec V en mL.

V (mL)	P_{GP} ($\times 10^3$ Pa)
15,00	202,9
20,00	152,2
25,00	121,7
30,00	101,5
35,00	869,6
40,00	76,09
45,00	67,63
50,00	54,00
55,00	55,34



4. L'écart de pression entre le gaz réel et le modèle du gaz parfait devient progressivement plus important lorsque la pression du gaz augmente. À la pression $P = 600$ hPa, l'écart relatif entre les deux valeurs est de 1,5 %. Il atteint 5,1 % pour une pression de 1 930 hPa.

› Conclusion

5. a. Dans les conditions habituelles de température et pression (20 °C et 1 bar), le modèle du gaz parfait est applicable au dioxyde de carbone, ainsi qu'à l'air et aux gaz courants (à la pression $P = 1\,000$ hPa, l'écart entre les deux valeurs reste encore suffisamment faible).

b. À de faibles pressions allant jusqu'à quelques bars, les molécules qui constituent le gaz sont suffisamment éloignées les unes des autres pour être considérées ponctuelles et sans interaction (autre que les chocs entre elles). Un gaz réel se comporte alors comme un gaz parfait.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel p. 384

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car c'est la valeur de la température mesurée d'un gaz qui rend compte du degré d'agitation des molécules qui le constituent.
La proposition B est une bonne réponse car plus les chocs des molécules d'un gaz sur les parois d'un récipient sont fréquents, plus la valeur mesurée de la pression est élevée.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car c'est la valeur de la masse volumique mesurée qui rend compte du nombre et de la masse des molécules qui constituent un volume de gaz donné.

2 La proposition A est une bonne réponse car l'échantillon de gaz est constitué de huit molécules en mouvement dans le récipient de plus grand volume.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car plus les chocs des molécules d'un gaz sur les parois d'un récipient sont fréquents, plus la valeur mesurée de la pression est élevée. Les molécules en mouvement sont plus nombreuses dans un volume équivalent à celui de la proposition A.
La proposition C est une bonne réponse car l'échantillon de gaz est constitué de quatre molécules en mouvement dans un volume plus faible.

3 La proposition A est une bonne réponse car plus l'agitation microscopique croît, plus la vitesse des particules augmente, plus la valeur mesurée de la température est grande.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car c'est la pression qui rend compte de la fréquence des chocs des molécules sur les parois d'un récipient.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la température thermodynamique s'exprime en kelvin.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, pour un même volume occupé et un nombre de particules identique, la masse des molécules est plus faible que dans la situation B. Plus les molécules sont dispersées et/ou plus leur masse est faible, plus la valeur mesurée de la masse volumique est faible.
La proposition B est une bonne réponse car la masse des molécules est la plus grande et le volume occupé par le gaz est le plus faible. Les molécules sont moins dispersées et leur masse est plus importante.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, pour un même nombre de molécules identiques, le volume occupé par le gaz est plus important.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car dans l'équation d'état du gaz parfait, P et V désignent respectivement la pression et le volume mesurés.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, dans l'équation d'état du gaz parfait, V ne désigne pas la vitesse des molécules mais le volume mesuré.
La proposition C est une bonne réponse.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, dans l'équation d'état du gaz parfait $P \cdot V = n \cdot \mathrm{R} \cdot T$, V doit être exprimé en m^3 et T en K.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, dans l'équation d'état du gaz parfait
$P \cdot V = n \cdot \mathrm{R} \cdot T$, P doit être exprimé en Pa.
La proposition C est une bonne réponse.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, à température constante, le rapport $\frac{P}{T}$ dépend du volume V occupé par la quantité n de gaz donné : $\frac{P}{T} = \frac{n \cdot \mathrm{R}}{V}$.
La proposition B est une bonne réponse car, à température constante et pour une quantité n de gaz donnée : $P \cdot V = n \cdot \mathrm{R} \cdot T$ et le produit $n \cdot \mathrm{R} \cdot T$ est constant.
La proposition C est une bonne réponse car, d'après la loi de Mariotte, si la température T d'une quantité de matière n donnée d'un gaz est constante, alors le produit $n \cdot \mathrm{R} \cdot T$ est constant. D'après l'équation d'état du gaz parfait, il en résulte que le produit $P \cdot V$ est constant.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le modèle du gaz parfait n'est valable que dans certaines conditions de pression.
La proposition B est une bonne réponse car le modèle du gaz parfait est applicable aux gaz réels à de faibles pressions allant jusqu'à quelques bars, c'est-à-dire lorsque les molécules qui constituent le gaz sont très éloignées les unes des autres.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le modèle du gaz parfait est applicable aux gaz réels à de faibles pressions, c'est-à-dire lorsque les molécules qui constituent le gaz sont très éloignées les unes des autres. Lorsque la température du système chimique devient inférieure à la température de vaporisation d'une espèce chimique, le gaz se liquéfie. Le modèle du gaz parfait n'est plus valable.

9 La proposition A est une bonne réponse car le modèle du gaz parfait est applicable aux gaz réels à de faibles pressions, c'est-à-dire lorsque les molécules qui constituent le gaz sont très éloignées les unes des autres.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, dans le modèle du gaz parfait, il n'y a pas d'interaction entre les molécules à l'exception de celles lors de chocs entre elles.
La proposition C est une bonne réponse car, dans le modèle du gaz parfait, on néglige le volume des molécules devant le volume occupé par le gaz. Les molécules sont alors assimilées à des points matériels.

10 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, dans le modèle du gaz parfait, les molécules sont assimilées à des points matériels.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car, dans le modèle du gaz parfait, les molécules qui constituent le gaz sont très éloignées les unes des autres.
La proposition C est une bonne réponse car, dans le modèle du gaz parfait, les molécules sont assimilées à des points matériels et sont très éloignées les unes des autres.

Acquérir les bases *p. 385*

› 1. Description d'un gaz

11 **1.** À l'échelle microscopique, la valeur de :
a. la température est liée au degré d'agitation des molécules ;
b. la pression est liée à la fréquence des chocs sur les parois ;
c. la masse volumique est liée au nombre et à la masse des particules.

2. La modification de la vitesse des constituants microscopiques d'un volume de gaz donné conduit ainsi au changement de la valeur de la température mesurée (réponse **a.**) et de la pression mesurée (réponse **b.**) En effet, si la vitesse des constituants microscopiques change, alors la fréquence de leurs chocs sur les parois sera également modifiée.

3. Dans le scénario **a.**, les molécules se déplacent moins vite : les valeurs de la température et de la pression mesurées diminuent mais la valeur de la masse volumique mesurée reste constante (réponse **f.**).
Dans le scénario **b.**, les molécules sont plus nombreuses : les valeurs de la pression et de la masse volumique mesurées augmentent mais la valeur de la température mesurée reste constante (réponse **d.**).
Dans le scénario **c.**, les molécules sont remplacées par des particules de masse plus faible : la valeur de la masse volumique diminue mais les valeurs de la température et de la pression mesurées restent constantes (réponse **e.**).

12 **1.** La température thermodynamique (aussi nommée température absolue) traduit le degré d'agitation des molécules d'un système. Notée T et exprimée en kelvin (K), elle est liée à la température θ de l'échelle Celsius (°C) par la relation suivante :

$$T = \theta + 273{,}15.$$

2. A θ = 16 °C ; B θ = – 22 °C ; C T = 274 K donc θ = 0,85 °C.
Donc, par ordre de degré d'agitation moléculaire décroissante : A > C > B.

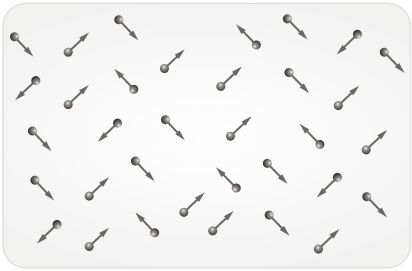
3. Quand il n'y a plus d'agitation des particules microscopiques d'un système, la température thermodynamique est nulle : T = 0 K, c'est le zéro absolu. La température thermodynamique est donc obligatoirement positive.

13 **1. a.** L'agitation des particules est plus importante dans le récipient 1 que dans le 2. Le gaz du récipient 1 est donc plus chaud : $T_1 > T_2$.

b. La valeur de la masse volumique mesurée est la même pour chaque gaz. En effet, un même nombre de molécules de même masse occupe le même volume.

c. La valeur de la pression mesurée est plus importante dans le récipient 1 que dans le 2. En effet, les molécules présentes en même nombre dans chaque récipient se déplacent plus rapidement dans le récipient 1 que dans le 2. Les chocs des molécules sur les parois y seront donc plus fréquents.

2. a.

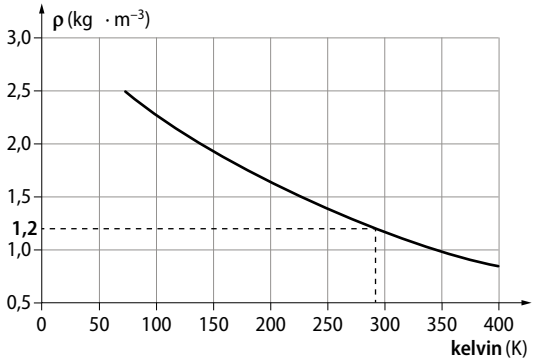


température T

b. L'agitation des constituants microscopiques du gaz permet cet échange d'énergie.

c. À l'équilibre, $T_1 > T > T_2$.

14 **1. a.**



Par lecture graphique, à 20 °C ou 293 K :
$\rho = 1{,}2$ kg · m^{-3}.

b. L'air est liquide pour des températures inférieures à 78,9 K = –216,2 °C.

2. a. L'axe des abscisses est gradué en kelvin. Il s'agit de la température thermodynamique, qui ne peut pas être négative.

b. Lorsque la température diminue, le degré d'agitation des particules augmente. Elles ont alors tendance à occuper un espace plus important : le volume augmente et la valeur de la masse volumique de l'air diminue.

› 2. Le modèle du gaz parfait

15 **1.** Pour un gaz parfait, le produit $P \cdot V$ dépend de sa quantité de matière (réponse **a.**) et de sa température (réponse **c**.).

2. $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

P : pression (en Pa) ; V : volume (en m^3) ; n : quantité de matière (en mol) ; R : constante du gaz parfait ($R \approx 8{,}31$ J · K^{-1} · mol^{-1}) ; T : température (en K).

3. a. La pression d'une quantité de gaz parfait donnée augmente lorsque, à volume constant, sa température augmente.

b. La pression d'une quantité de gaz parfait donnée augmente lorsque, à température constante, son volume diminue

16 **1. a.** La quantité de matière n contenue dans la masse m de gaz considéré est donnée par : $n = \dfrac{m}{M}$.

AN : $n = \dfrac{7{,}5}{28{,}9} = 2{,}6 \times 10^{-1}$ mol

b. On applique la relation :

$$T\,(\text{en K}) = \theta\,(\text{en °C}) + 273{,}15$$

AN : $T = 273{,}15 + 17 = 290{,}15$ K

1 m^3 = 10^3 L, donc $V = 4{,}8 \times 10^{-3}$ m^3.

c. L'équation d'état du gaz parfait s'écrit :
$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ soit :

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}.$$

AN : $P = \dfrac{2{,}6 \times 10^{-1} \times 8{,}314 \times 290{,}15}{4{,}8 \times 10^{-3}} = 1{,}30 \times 10^5$ Pa

2. a. La valeur de la pression mesurée est proportionnelle à la valeur de la température thermodynamique exprimée en K, non en °C.

b. Pour $\theta = 34$ °C, alors $T = 273{,}15 + 34 = 307{,}15$ K.

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

AN : $P = \dfrac{2{,}6 \times 10^{-1} \times 8{,}314 \times 307{,}15}{4{,}8 \times 10^{-3}} = 1{,}38 \times 10^5$ Pa

c. Pour T = 290,15 × 2 = 580,3 K = 307,15 °C, la valeur de la pression serait doublée.

17 **1.** $V = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{P}$

AN : $V = \dfrac{1{,}5 \times 10^{-2} \times 8{,}314 \times 293{,}15}{1013 \times 10^2} = 3{,}6 \times 10^{-4}$ m^3

2. a. La valeur du volume occupé par un gaz augmente lorsque, à pression constante, sa température augmente.

b. La valeur du volume occupé par un gaz augmente lorsque, à température constante, sa pression diminue.

c. La valeur du volume occupé par un gaz ne varie pas lorsque, à température et pression constantes, on remplace l'air par du dioxyde de carbone.

18 **1.** $n = \dfrac{P \cdot V}{R \cdot T}$

AN : $n = \dfrac{1{,}1 \times 10^5 \times 2{,}0 \times 10^{-3}}{8{,}314 \times (273{,}15 + 25)} = 8{,}9 \times 10^{-2}$ mol

2. a. $P = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{V}$

AN : $P = \dfrac{8{,}9 \times 10^{-2} \times 8{,}314 \times 298{,}15}{3{,}0 \times 10^{-3}}$

$= 7{,}4 \times 10^4$ Pa $= 0{,}74$ bar

b. $T = \dfrac{P \cdot V}{n \cdot R}$

AN : $T = \dfrac{1{,}1 \times 10^5 \times 3{,}0 \times 10^{-3}}{8{,}9 \times 10^{-2} \times 8{,}314}$

$= 4{,}5 \times 10^2$ K $= 1{,}7 \times 10^2$ °C

c. $n = \dfrac{P \cdot V}{R \cdot T}$

AN : $n = \dfrac{1{,}1\times10^{5}\times3{,}0\times10^{-3}}{8{,}314\times(273{,}15+25)} = 1{,}3\times10^{-1}$ mol d'hélium au total, soit $4{,}4\times10^{-2}$ mol d'hélium à rajouter, c'est-à-dire une masse $m = 4{,}4\times10^{-2}\times4{,}0 = 0{,}18$ g.

19 **1.** D'après l'équation d'état du gaz parfait $P\cdot V = n\cdot R\cdot T$, il vient :

$$n = \frac{P\cdot V}{R\cdot T}$$

$P = 1{,}1$ bar $= 1{,}1\times10^{5}$ Pa, $V = 1{,}0$ L $= 1{,}0\times10^{-3}$ m^3 et $T = (273{,}15 + 25)$ K.

AN : $n = \dfrac{1{,}1\times10^{5}\times1{,}0\times10^{-3}}{8{,}314\times(273{,}15+25)} = 4{,}4\times10^{-2}$ mol.

2. La constante d'Avogadro N_A permet le passage du macroscopique au microscopique selon la relation : $N = n\cdot N_A$.

AN : $N = 4{,}4\times10^{-2}\times6{,}02\times10^{23}$
$= 2{,}6\times10^{22}$ molécules

Le volume propre occupé par l'ensemble des molécules vaut alors : $V = N\cdot V$ (molécule).

AN : $V = 2{,}6\times10^{22}\times7{,}0\times10^{-28}$ L $= 1{,}9\times10^{-5}$ L
$= 19$ µL.

3. Le volume propre des molécules (19 µL) est négligeable devant celui qu'elles occupent (1 L). Le diazote peut être assimilé à un gaz parfait.

20 **1.** Lors du gonflage, avant que le ballon ait pris sa forme définitive, le volume V de l'air qu'il contient augmente en même temps que la masse m d'air : la masse volumique ρ de l'air dans le ballon reste ainsi constante ($\rho_{air} \approx 1{,}2$ kg · m^{-3}). De même, la pression P de l'air dans la sphère ne varie quasiment pas ($P \approx 1{,}0$ bar).
Lorsque le ballon a atteint sa forme définitive, son volume V ne varie plus alors que la masse m de l'air augmente : la masse volumique de l'air du ballon augmente ainsi que sa pression.

2. L'équation d'état du gaz parfait s'écrit :
$P\cdot V = n\cdot R\cdot T$ et la masse volumique :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{n\cdot M}{V}.$$

Lors de la première phase du gonflage, l'augmentation de la quantité de matière n d'air dans le ballon s'accompagne d'une augmentation du volume V du ballon. La pression P de l'air dans le ballon reste constante de même que sa masse volumique ρ.
Lors de la seconde phase du gonflage, l'augmentation de la quantité de matière n d'air à volume constant s'accompagne d'une augmentation de la pression P et de la masse volumique ρ.

21 **1. a.** $V = \dfrac{m}{\rho}$

AN : $V = \dfrac{1{,}6\times10^{-3}}{2{,}0} = 8{,}0\times10^{-4}$ m^3.

b. $n = \dfrac{P\cdot V}{R\cdot T}$

AN : $n = \dfrac{1{,}013\times10^{5}\times8{,}0\times10^{-4}}{8{,}314\times(273{,}15+20)} = 3{,}3\times10^{-2}$ mol

c. $V_m = \dfrac{V}{n}$

AN : $V_m = \dfrac{8{,}0\times10^{-4}}{3{,}3\times10^{-2}} = 0{,}024$ m^3 · mol^{-1} $= 24$ L · mol^{-1}

d. La valeur du volume molaire diminue lorsque la température du gaz diminue. À la température de –10 °C :

$n = \dfrac{1{,}013\times10^{5}\times8{,}0\times10^{-4}}{8{,}314\times(273{,}15-10)} = 3{,}7\times10^{-2}$ mol soit :

$V_m = \dfrac{V}{n} = 21$ L · mol^{-1}.

2. a. $V = \dfrac{m}{\rho}$

AN : $V = \dfrac{1{,}6\times10^{-3}}{2{,}7} = 5{,}9\times10^{-4}$ m^3

b. $n = \dfrac{P\cdot V}{R\cdot T}$

AN : $n = \dfrac{1{,}013\times10^{5}\times5{,}9\times10^{-4}}{8{,}314\times(273{,}15+20)} = 2{,}5\times10^{-2}$ mol

c. La valeur du volume molaire ne dépend pas de la nature du gaz.
d. À la température de –10 °C, le butane est liquide.

22 **1.** Si la température T d'une quantité de matière n donnée d'un gaz est constante, alors le produit $n\cdot R\cdot T$ est constant. D'après l'équation d'état du gaz parfait, il en résulte que $P\cdot V =$ constante.

2. a. $P_1\cdot V_1 = P_2\cdot V_2 = P\cdot V$

AN : $P\cdot V = 1\,021\times18{,}0 = 1{,}84\times10^{4}$ hPa · cm^3.

$P_1 = \dfrac{1{,}84\times10^{4}}{6{,}0} = 3\,063$ hPa

$P_2 = \dfrac{1{,}84\times10^{4}}{2{,}0} = 9\,189$ hPa.

b. L'écart entre les valeurs théoriques et expérimentales augmente lorsque la valeur de la pression du gaz devient trop importante. Ce n'est que pour de faibles pressions, allant jusqu'à quelques bars, qu'un gaz réel se comporte comme un gaz parfait.

Faire le point avant d'aller plus loin p. 387

Décrire le gaz parfait à l'échelle microscopique.

Dans le modèle du gaz parfait, les molécules sont assimilées à des points matériels et sont très éloignées les unes des autres. Elles sont animées d'un mouvement rectiligne uniforme entre deux chocs (toutes les interactions entre les molécules sont négligées à l'exception de celles qui ont lieu lors de chocs entre elles).

Citer les limites d'application du modèle du gaz parfait.

Un gaz réel se comporte comme un gaz parfait uniquement à de faibles pressions allant jusqu'à quelques bars.

Écrire la relation liant, à température constante, la pression et le volume d'une quantité donnée de gaz parfait. Comment est-elle nommée ?

$P \cdot V =$ constante. C'est la loi de Mariotte.

De quels paramètres dépend le volume molaire d'un gaz ?

La valeur du volume molaire V_m d'un gaz parfait ne dépend que de sa température et de sa pression : $V_m = \dfrac{R \cdot T}{P}$.

Relier les valeurs de la pression et de la masse volumique mesurées aux propriétés microscopiques d'un gaz.

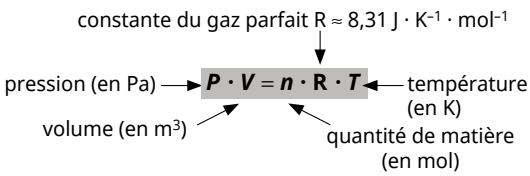
La valeur de la pression mesurée d'un gaz a pour origine les chocs des particules microscopiques sur les parois d'un récipient. La masse volumique est une mesure de la masse des particules microscopiques contenues dans une unité de volume du gaz.

Qu'appelle-t-on température thermodynamique ? Qu'est-ce que le zéro absolu ?

La température thermodynamique est une grandeur qui traduit le degré d'agitation des molécules d'un système. Notée T, elle est exprimée en kelvin (K).

Quand il n'y a plus d'agitation des particules microscopiques d'un système, la température thermodynamique est nulle : $T = 0$ K, c'est le zéro absolu.

Écrire l'équation d'état du gaz parfait en explicitant chaque grandeur et son unité.



Quel est le lien entre la température thermodynamique et la température Celsius ?

La température thermodynamique est liée à la température θ de l'échelle Celsius (°C) par la relation suivante :

$$T\,(\text{en K}) = \theta\,(\text{en °C}) + 273{,}15$$

Nommer les grandeurs macroscopiques de description d'un gaz réel et donner leur unité.

À l'échelle macroscopique, l'état d'un gaz peut être décrit au moyen de trois grandeurs mesurables : la pression P (en Pa ou en bar…), la température T (en K, en °C ou en °F) et la masse volumique ρ (en $kg \cdot m^{-3}$ ou en $g \cdot mL^{-1}$…)

Exercice similaire à l'exercice résolu p. 388

24 **1. a.** D'après l'équation d'état du gaz parfait $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$, il vient :

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

$n = 7 \times 7{,}0 \times 10^{-2}$ mol, $V = 10{,}0$ mL $= 10 \times 10^{-6}$ m^3 et $T = (20 + 273)$ K.

AN :

$$P = \frac{7 \times 7{,}0 \times 10^{-2} \times 8{,}314 \times 293}{10 \times 10^{-6}}$$

$$= 1{,}2 \times 10^{8} \text{ Pa} = 1\,200 \text{ bar}$$

b. D'après l'équation d'état du gaz parfait : $T = \dfrac{P \cdot V}{n \cdot R}$.

Une augmentation de la pression P d'une quantité de matière n de gaz donnée s'accompagne d'une augmentation de la température T.

2. a. D'après l'équation d'état du gaz parfait : $V = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{P}$.

AN : $V = \dfrac{7 \times 7{,}0 \times 10^{-2} \times 8{,}314 \times 293}{1{,}0 \times 10^{5}} = 1{,}2 \times 10^{-2}$ m^3

soit 1 200 fois plus grand que le volume initial $V = 10{,}0$ mL $= 10 \times 10^{-6}$ m^3.

b. L'augmentation excessive de la pression du gaz se traduit par une augmentation de la fréquence des chocs des molécules sur les parois du récipient qui le contient. Cela s'accompagne d'une augmentation du volume.

S'entraîner pour maîtriser p. 389

25 **1. a.** $n_A = \dfrac{P \cdot V_A}{R \cdot T_A}$.

$V_A = 2{,}0$ L $= 2{,}0 \times 10^{-3}$ m^3

AN : $n_A = \dfrac{1{,}0 \times 10^{5} \times 2{,}0 \times 10^{-3}}{8{,}314 \times (273{,}15 + 25{,}0)} = 8{,}1 \times 10^{-2}$ mol

$n_B = \dfrac{P \cdot V_B}{R \cdot T_B}$

$V_B = 4{,}0\ L = 4{,}0 \times 10^{-3}\ m^3$

AN : $n_B = \dfrac{1{,}0 \times 10^5 \times 4{,}0 \times 10^{-3}}{8{,}314 \times (273{,}15 + 17{,}0)} = 1{,}7 \times 10^{-1}$ mol

b. Le degré d'agitation des molécules est plus important dans le récipient A mais la fréquence des chocs est identique car la pression est identique.

2. a. $V_t = 4{,}0 + 2{,}0 = 6{,}0$ L

b. $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ donc $T = \dfrac{P \cdot V}{n \cdot R}$.

$T = \dfrac{1{,}0 \times 10^5 \times 6{,}0 \times 10^{-3}}{8{,}314 \times (165 + 81)} = 293{,}4\ K = 20{,}4\ °C \approx 20\ °C$

26 **1.** $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$. À T et P constants, V dépend uniquement de n et non de la nature du gaz.

2. a. Pour $n = 1{,}0$ mol, $T = 293$ K et $P = 1{,}013 \times 10^5$ Pa, alors :

$V = \dfrac{1{,}0 \times 8{,}314 \times 293}{1{,}013 \times 10^5} = 2{,}4 \times 10^{-2}\ m^3 = 24$ L

Donc $V_m = 24\ L \cdot mol^{-1}$.

b. $V = 24$ L car le volume molaire ne dépend pas de la nature du gaz.

c. $N = n \cdot N_A$

$N = 6{,}02 \times 10^{23}$ molécules.

3. a. Lorsque la température diminue, le degré d'agitation des particules est moins grand. Les molécules ont tendance à occuper un volume plus faible.

b. $V = \dfrac{1{,}0 \times 8{,}314 \times 273}{1{,}013 \times 10^5} = 2{,}2 \times 10^{-2}\ m^3 = 22\ L$.

Cela confirme la prévision.

27 **1. a.** $\rho = \dfrac{m}{V} = \dfrac{n \cdot M}{V} = \dfrac{P \cdot V \cdot M}{R \cdot T \cdot V} = \dfrac{P \cdot M}{R \cdot T}$.

b. $\rho = \dfrac{P \cdot M}{R \cdot T}$. La valeur de la masse volumique d'un gaz parfait diminue lorsque sa température augmente (à pression constante). Elle augmente lorsque sa pression augmente (à température constante).

c. Lorsque le degré d'agitation des molécules est plus important, les molécules ont tendance à occuper un volume plus grand. Lorsque la fréquence des chocs augmente, c'est que le nombre de molécules est plus grand.

2. a. $\rho = \dfrac{1{,}0 \times 10^5 \times 28{,}9 \times 10^{-3}}{8{,}314 \times (273{,}15 + 20)} = 1{,}2\ kg \cdot m^{-3}$

b. $\rho = \dfrac{0{,}3 \times 10^5 \times 28{,}9 \times 10^{-3}}{8{,}314 \times (273{,}15 - 40)} = 0{,}45\ kg \cdot m^{-3}$

3. La masse molaire de l'hélium est 7,2 fois plus faible que celle de l'air. Dans les mêmes conditions de température et de pression, la valeur de la masse volumique de l'hélium est 7,2 fois plus faible que celle de l'air.

28 **1.** $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

P : pression (en Pa) ; V : volume (en m^3) ; n : quantité de matière (en mol) ; R : constante du gaz parfait ($R \approx 8{,}31\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$) ; T : température (en K).

2. a.

	Abscisses	Ordonnées
A	V	P
B	T	P
C	n	P
D	V	T

b. A : n et T ; B : V et n ; C : T et V ; D : P et n.

c. A : $P \cdot V =$ constante ; B : $\dfrac{P}{T} =$ constante ;

C : $\dfrac{P}{n} =$ constante ; D : $\dfrac{V}{T} =$ constante

29 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur. Il faut lire, sur le schéma, « graduation = 2 mL » et une pression mesurée de 1,76 bar. Cette erreur a été corrigée sur le manuel de l'élève et les manuels numériques.*

1. a. Des lectures sur le thermomètre et la seringue amènent :

$\theta = 56{,}0$ °C, $u_\theta = 1°$ C ; $V = 28{,}0$ mL, $u_V = 1$ mL.

b. $1\ m^3 = 10^3\ L = 10^6$ mL et T (en K) $= \theta$ (en °C) $+ 273{,}15$ donc : $V = 2{,}80 \times 10^{-5}\ m^3$ et $T = 299$ K.

2. a. D'après l'équation d'état du gaz parfait $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$, il vient : $P_{GP} = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{V}$.

b. $P_{GP} = \dfrac{2{,}00 \times 10^{-3} \times 8{,}314 \times 299}{2{,}80 \times 10^{-5}} = 1{,}78 \times 10^5$ Pa

$= 1{,}78$ bar

$u_P = 1{,}78 \times 10^5 \times \sqrt{\left(\dfrac{1}{299}\right)^2 + \left(\dfrac{1}{28{,}0}\right)^2}$

$= 6{,}37 \times 10^3$ Pa $= 6{,}37 \times 10^{-2}$ bar

c. $(P_{GP} - u_P) < P_{GP} < (P_{GP} + u_P)$ soit :

$1{,}71\ bar < P_{GP} < 1{,}85\ bar$

3. a. Une lecture sur le manomètre amène : $P_{GR} = 1{,}76$ bar, $u_P = 0{,}005$ bar.

$(P_{GR} - u_P) < P_{GR} < (P_{GR} + u_P)$ soit :

$1{,}75\ bar < P_{GR} < 1{,}77\ bar$

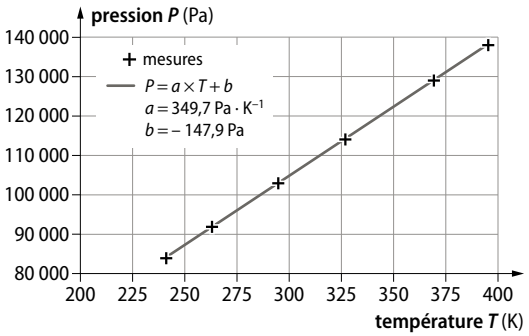
b. On constate ici que P_{GR} est contenu dans l'encadrement de P_{GP}. L'air peut donc être assimilé à un

gaz parfait dans ces conditions de température et de pression.

30 **1.**

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
x = np.array([241.05, 263.05, 294.75, 326.75,
369.15, 395.15])
y = np.array([84000, 92000, 103000, 114000,
129000, 138000])
plt.plot(x, y,"r+",label="Mesures")
plt.xlim(200,400)
plt.ylim(80000,140000)
plt.title("Evolution de la pression en
fonction de la température")
plt.xlabel("température T en K")
plt.ylabel("pression P en Pa")
plt.show() # affiche la figure a l'ecran
```

2.



$P = a \cdot T + b$. On trouve $a = 349{,}7$ Pa · K^{-1} et $b = -147{,}9$ Pa.

3. D'après l'équation d'état du gaz parfait :

$a = \dfrac{n \cdot R}{V}$ soit $a = 346{,}3$ Pa · K^{-1} et $b = 0$.

L'écart relatif entre les valeurs expérimentale (modélisation des mesures) et théorique est de 1 %. Le modèle du gaz parfait est applicable.

31 **1. a.** L'échauffement du pneu se traduit par une augmentation du degré d'agitation des particules microscopiques et, ainsi, de la fréquence des chocs sur les parois du pneu. À l'échelle macroscopique, T augmente et P augmente. En revanche, le nombre de particules et le volume du pneu restent constants : la masse volumique reste constante.

b. D'après l'équation d'état du gaz parfait : $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$. Si T augmente, alors P augmente.

c. D'après l'équation d'état du gaz parfait, il vient :

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \text{ et } T = \frac{P \cdot V}{n \cdot R}.$$

À froid :

$P = 2{,}5$ bar $= 2{,}5 \times 10^5$ Pa, $V = 16$ L $= 16 \times 10^{-3}$ m^3 et $T = 273{,}15 + 20 = 293{,}15 \approx 293$ K.

À chaud : $P = 2{,}5 + 0{,}3$ bar $= 2{,}8 \times 10^5$ Pa et $V = 16$ L $= 16 \times 10^{-3}$ m^3.

AN : $n = \dfrac{2{,}5 \times 10^5 \times 16 \times 10^{-3}}{8{,}314 \times 293} = 1{,}6$ mol

$$T = \frac{2{,}8 \times 10^5 \times 16 \times 10^{-3}}{1{,}64 \times 8{,}314} = 328{,}6 \text{ K} = 55{,}4 \text{ °C} \approx 55 \text{ °C}$$

2. Une augmentation du degré d'agitation des particules (de la température) s'accompagne pour une quantité de gaz donnée à volume constant d'une augmentation de la fréquence des chocs sur les parois (donc de la pression). La masse volumique reste quant à elle constante car le nombre de particules et le volume occupé restent constants.

32 **1. a.** La masse volumique du gaz diminue (car sa masse reste constante et son volume augmente), la température augmente (par chauffage) et la pression reste constante (l'index, à l'équilibre en position B, est soumis à la pression atmosphérique d'une part de l'air extérieur et d'autre part de l'air chauffé).

b. D'après l'équation d'état du gaz parfait $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$, il vient :

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \text{ et } T = \frac{P \cdot V}{n \cdot R}$$

À l'état initial, $P = 1{,}0 \times 10^5$ Pa,
$V = 250$ mL $= 250 \times 10^{-6}$ m^3 et $T = (273{,}15 + 19)$ K
À l'état final, le volume total est

$V = \ell \cdot \pi \cdot \dfrac{d^2}{4} + V(\text{initial})$, où ℓ est la longueur du déplacement de l'index.

AN : Initialement en A :

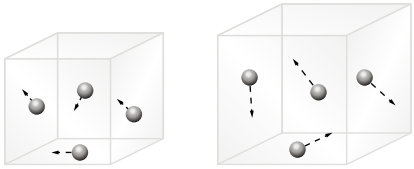
$$n = \frac{1{,}0 \times 10^5 \times 250 \times 10^{-6}}{8{,}314 \times (273{,}15 + 19)} = 1{,}0 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

Pour $\ell = 2{,}0$ cm, $V = (250 + 0{,}8) \times 10^{-6}$ m$^3 = 250{,}8$ mL.

$$T = \frac{1{,}0 \times 10^5 \times 250{,}8 \times 10^{-6}}{8{,}314 \times 1{,}0 \times 10^{-2}} = 301{,}7 \text{ K} = 28{,}6 \text{ °C}$$

≈ 29 °C soit une augmentation de 10 °C.

2. a. État initial État final



b. Le degré d'agitation des particules est plus important lorsque la température du gaz augmente. Leur vitesse est alors plus grande et elles tendent à occuper un volume plus important à pression constante.

33 ***La pile GÉNÉPAC***

La pile GÉNÉPAC est une pile à combustible ayant équipé en 2009 un voilier participant au projet « Zéro CO_2 ». Son principe utilise une réaction chimique contrôlée entre du dihydrogène et le dioxygène de l'air pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Le dihydrogène est stocké à bord sous forme de gaz comprimé à la pression de 700 bars, le volume du réservoir est V = 15,0 L. Lorsque le réservoir de dihydrogène est plein, la masse du dihydrogène disponible est de 3,0 kg.

1. *Calculer la quantité de matière de dihydrogène dans le réservoir complet.*

2. *Le dihydrogène est un gaz parfait. Déterminer :*
a. *le volume V de dihydrogène, aux conditions habituelles de pression (1 013 hPa) et de température (20 °C), qui a dû être comprimé pour remplir le réservoir.*
b. *le volume correspondant à 20 °C et à une pression de 700 bar.*

3. *Comparer ce résultat au volume réel du réservoir. En déduire une conclusion sur le choix du modèle du gaz parfait.*

1. $n(H_2) = \dfrac{3{,}0 \times 10^3}{2{,}0} = 1{,}5 \times 10^3$ mol.

2. a. $V_0 = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{P}$

AN : $V_0 = \dfrac{1{,}5 \times 10^3 \times 8{,}314 \times 293{,}15}{1{,}013 \times 10^5} = 36$ m^3

b. $V = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{P}$

AN : $V = \dfrac{1{,}5 \times 10^3 \times 8{,}314 \times 293{,}15}{700 \times 1{,}013 \times 10^5}$

$= 5{,}2 \times 10^{-2}$ m$^3 = 52$ L.

3. 52 L >> 15,0 L : le modèle du gaz parfait est applicable pour des pressions allant jusqu'à quelques bars seulement.

34 **Exemple d'exposé oral**

La réaction entre le luminol et l'eau oxygénée est réalisée dans une enceinte fermée. La formation de diazote, seul produit gazeux, crée une surpression qui s'additionne à la pression de l'air initialement présent. Grâce à un capteur de pression, on mesure, en fonction du temps, la valeur de la pression P à l'intérieur de l'enceinte. Un traitement des mesures permet de tracer l'évolution de l'avancement de la réaction en fonction du temps. On se place dans le domaine de validité du **modèle du gaz parfait** : tous les gaz sont considérés comme parfaits.

D'après l'**équation d'état du gaz parfait,** la pression initiale du gaz est :

$P_0 \cdot V_{gaz} = n(\text{air}) \cdot R \cdot T$ donc :

$P_0 = \dfrac{n(\text{air}) \cdot R \cdot T}{V_{gaz}}$

À chaque instant t donné, la pression vaut :

$P \cdot V_{gaz} = (n(\text{air}) + n(N_2)) \cdot R \cdot T$

$P = \dfrac{(n(\text{air}) + n(N_2)) \cdot R \cdot T}{V_{gaz}}$

$= \dfrac{n(\text{air}) \cdot R \cdot T}{V_{gaz}} + \dfrac{n(N_2) \cdot R \cdot T}{V_{gaz}}$

$= P_0 + \dfrac{n(N_2) \cdot R \cdot T}{V_{gaz}}$

Il vient $n(N_2) = \dfrac{P - P_0}{R \cdot T} \cdot V_{gaz}$

D'après le tableau d'avancement, $n(N_2) = 2x$.

Ainsi, $x = \dfrac{P - P_0}{2R \cdot T} \cdot V_{gaz}$.

D'après le suivi cinétique, $x_f = 7{,}0 \times 10^{-4}$ mol. Cette valeur est obtenue à partir de la valeur de la **pression finale** mesurée.

$P_f = P_0 + \dfrac{2x_f \cdot R \cdot T}{V_{gaz}}$

AN : $P_f = 1{,}013 \times 10^5 + \dfrac{2 \times 7{,}0 \times 10^{-4} \times 8{,}314 \times 300}{2{,}1 \times 10^{-3}}$

$= 1{,}03 \times 10^5$ Pa

À l'échelle microscopique, la **quantité de matière** de gaz dans l'enceinte de volume constant augmente lors de la réaction. Cette variation s'accompagne, à volume et température constants, d'une augmentation de la fréquence des chocs sur les parois de l'enceinte : la pression augmente. Ces changements s'effectuent à **température thermodynamique** constante : le degré d'**agitation thermique** des particules reste le même.

35 **Exemple d'exposé oral**

Le chauffage de l'air du ballon d'une montgolfière permet une augmentation de sa température. À l'échelle microscopique, le degré d'agitation des particules augmente. La pression de l'air à l'intérieur de l'enveloppe du ballon restant constante (et égale à la pression de l'air à l'extérieur), le gaz a tendance à occuper un volume plus important ($P \cdot V = n \cdot R \cdot T$: si T augmente, alors V augmente à n et P constants). La masse volumique de l'air dans le ballon diminue et devient plus faible que celle de l'air extérieur.

Lorsqu'elle devient suffisamment faible, la poussée d'Archimède exercée sur le ballon atteint alors une valeur supérieure au poids de l'air dans le ballon et de la nacelle. Le ballon décolle.

Une erreur de numérotation des exercices s'est glissée dans les pages 392 et 393 du spécimen du professeur. Les exercices doivent être numérotés 36, 37 et 38. Cette erreur a été rectifiée dans le manuel de l'élève et dans les manuels numériques. Le livre du professeur tient compte de la numérotation corrigée.

36 › Questions préliminaires

1. Le gaz est constitué d'air à l'état initial, d'air et de dioxygène à l'état final. Les conditions de température et de pression (23 °C et 1,1 bar) permettent d'assimiler chacun de ces gaz à un gaz parfait.

2. $\Delta P = P(t_f) - P(0)$. On estime d'après le doc. 3 que $t_f = 140$ min et $P(t_f) = 1\,111$ hPa.
$\Delta P = 91$ hPa

3. L'avancement final de la réaction est égal à l'avancement maximal :

$$x_f = x_{max} = \frac{n_{(ClO^-)i}}{2} = \frac{(c_0/10) \cdot V_1}{2}.$$

AN : $x_f = 1{,}03 \times 10^{-3}$ mol
À l'état final, la quantité de matière de dioxygène formée est :
$n_{(O_2)f} = x_f = 1{,}03 \times 10^{-3}$ mol

› Problématique

À n'importe quel instant *t,* la pression totale *P* du gaz dans le ballon est due à l'air atmosphérique présent initialement dans le ballon et à la quantité de dioxygène gazeux formé.
À $t = 0$ s, $P = P(0)$. À t_f, $P = P(0) + P_{(O_2)f}$
D'après l'équation d'état du gaz parfait :
$P_{(O_2)f} \cdot V = n_{(O_2)f} \cdot R \cdot T = x_f \cdot R \cdot T$
Ainsi, à t_f : $(P - P(0)) = \Delta P = \dfrac{x_f \cdot R \cdot T}{V}$
Soit $x_f = \dfrac{\Delta P \cdot V}{R \cdot T}$

AN : $x_f = \dfrac{91 \times 10^2 \times 275 \times 10^{-6}}{8{,}314 \times (273{,}15 + 23)}$

$x_f = 1{,}02 \times 10^{-3}$ mol

On constate que les deux valeurs de l'avancement final obtenues sont pratiquement identiques. La valeur théorique obtenue en considérant la réaction totale proposée amène une valeur identique à celle réelle constatée expérimentalement. L'équation de la réaction peut être validée.

37 › Démarche experte

Le volume d'un ballon sonde peut être estimé à partir d'une mesure de son diamètre moyen sur le document 1 et de la relation $V = \dfrac{4}{3}\pi \cdot r^3$.

AN : Sur le document 1, on peut estimer la taille de la personne de 0,25 cm de hauteur à 1,8 m. Ainsi, le diamètre du ballon, de 1,4 cm sur le document, correspond en réalité à environ 10 m.

$$V = \frac{4}{3}\pi \times 5{,}0^3 = 5{,}2 \times 10^2 \text{ m}^3$$

L'enveloppe élastique du ballon ne peut pas dépasser un volume $V_{max} = 6V$ soit :

$$V_{max} = 3{,}1 \times 10^3 \text{ m}^3$$

Les couches supérieures de la couche d'ozone (situées à partir d'environ 40 km d'altitude) sont caractérisées par une pression et une température d'environ $P = 3$ hPa et $\theta = -5$ °C.
La quantité de matière d'hélium dans le ballon est constante lors de l'ascension et vaut :

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}.$$

AN : $n = \dfrac{1{,}0 \times 10^5 \times 5{,}2 \times 10^2}{8{,}314 \times (273{,}15 + 20)} = 2{,}1 \times 10^4$ mol

On calcule le volume du ballon dans les couches supérieures de la couche d'ozone :

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$$

AN : $V = \dfrac{2{,}1 \times 10^4 \times 8{,}314 \times 268{,}15}{3 \times 10^2} = 1{,}6 \times 10^5$ m^3

Ce ballon ne pourra pas atteindre les couches supérieures de la couche d'ozone situées à environ 40 km d'altitude. En revanche, il pourra atteindre les couches inférieures situées à des altitudes légèrement supérieures à 10 km d'altitude où il règne une température d'environ –56 °C et une pression d'environ 200 hPa car, dans ces conditions, $V = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{P}$.

AN : $V = \dfrac{2{,}1 \times 10^4 \times 8{,}314 \times (273{,}15 - 56)}{2 \times 10^4}$
$= 1{,}9 \times 10^3$ m$^3 < V_{max}$

› Démarche avancée

Une erreur s'est glissée à la question 2 dans le spécimen du professeur. Il faut lire « pour une température égale à –56 °C, puis à –5 °C ». Cette erreur a été rectifiée dans le manuel de l'élève et dans les manuels numériques.

1. a. Le volume d'un ballon sonde peut être estimé à partir d'une mesure de son diamètre moyen sur le document 1 et de la relation $V = \dfrac{4}{3}\pi \cdot r^3$.

D'après l'équation d'état du gaz parfait, la quantité de matière d'hélium dans le ballon vaut : $n = \dfrac{P \cdot V}{T \cdot R}$.

AN : Sur le document 1, on peut estimer la taille de la personne de 0,25 cm de hauteur à 1,8 m. Ainsi,

le diamètre du ballon, de 1,4 cm sur le document, correspond en réalité à environ 10 m.

$$V = \frac{4}{3}\pi \times 5{,}0^3 = 5{,}2 \times 10^2 \text{ m}^3$$

$$n = \frac{1{,}0 \times 10^5 \times 5{,}2 \times 10^2}{8{,}314 \times (273{,}15 + 20)} = 2{,}1 \times 10^4 \text{ mol}$$

b. Les couches supérieures de la couche d'ozone sont caractérisées par une pression et une température d'environ $P = 3$ hPa et $\theta = -5$ °C.
On calcule le volume du ballon dans les couches supérieures de la couche d'ozone :

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$$

AN : $V = \dfrac{2{,}1 \times 10^4 \times 8{,}314 \times 268{,}15}{3 \times 10^2} = 1{,}6 \times 10^5 \text{ m}^3$

Ce ballon ne pourra pas atteindre les couches supérieures de la couche d'ozone situées à environ 40 km d'altitude car l'enveloppe élastique du ballon ne peut pas dépasser un volume $V_{max} = 6V$ soit $V_{max} = 3{,}1 \times 10^3$ m^3.

2. Lorsque le ballon éclate, $V_{max} = 3{,}1 \times 10^3$ m^3.

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

AN : À – 56 °C :

$$P = \frac{2{,}1 \times 10^4 \times 8{,}314 \times (273{,}15 - 56)}{3{,}1 \times 10^3}$$
$$= 122 \text{ hPa} \approx 1{,}2 \times 10^2 \text{ hPa}$$

À – 5 °C :

$$P = \frac{2{,}1 \times 10^4 \times 8{,}314 \times (273{,}15 - 5)}{3{,}1 \times 10^3}$$
$$= 157 \text{ hPa} \approx 1{,}6 \times 10^2 \text{ hPa}.$$

À environ 10 km d'altitude, la température est de – 56 °C et la pression atmosphérique vaut environ 200 hPa. Le ballon atteint cette altitude.
En revanche, à 50 km d'altitude, la température est de – 5 °C et la pression d'environ 3 hPa. Le ballon ne peut pas atteindre cette altitude.

38 **1. a.** $M_{air} = M(N_2) \times 0{,}79 + M(O_2) \times 0{,}21$
$= 28{,}0 \times 0{,}79 + 32{,}0 \times 0{,}21$
$= 28{,}84 \approx 28{,}8 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

b. Pour $n = 1{,}00$ mol, alors $V_{m0} = \dfrac{R \cdot T_0}{P_0}$.

AN : $V_{m0} = \dfrac{8{,}31 \times 288}{1{,}00 \times 10^5} = 2{,}39 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
$= 23{,}9 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$

d. $\rho_{air} = \dfrac{m_{air}}{V_{air}}$. Pour une quantité de matière égale à 1 mol, alors $\rho_{air} = \dfrac{M_{air}}{V_m}$.

À $\theta_0 = 15$ °C et $P_0 = 1{,}00 \times 10^5$ Pa, alors $\rho_{air} = \dfrac{M_{air}}{V_{m0}}$.

AN : $\rho_{air} = \dfrac{28{,}8}{23{,}9} = 1{,}21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

La masse d'air contenu dans 1,0 L est alors égale à 1,2 g et la quantité de matière à $4{,}2 \times 10^{-2}$ mol.

2. a. $V = \dfrac{n_{air} \cdot R \cdot T}{P}$.

À la profondeur $z = 11\,000$ m, $P = 1{,}08 \times 10^5$ Pa ($P = P_0 + \rho_{eau} \cdot g \cdot z$).

AN : $V = 9{,}3 \times 10^{-7}$ m^3 = 0,93 mL

b. $\rho_{air} = \dfrac{1{,}2 \times 10^{-3}}{9{,}3 \times 10^{-7}} = 1{,}3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} > \rho_{eau}$.

La masse volumique de l'air étant supérieure à celle de l'eau, les bulles d'air devraient couler. L'air ne peut plus être considéré comme un gaz parfait, la température n'est plus égale à 15 °C à cette profondeur, g n'est pas constante (elle dépend de l'altitude).

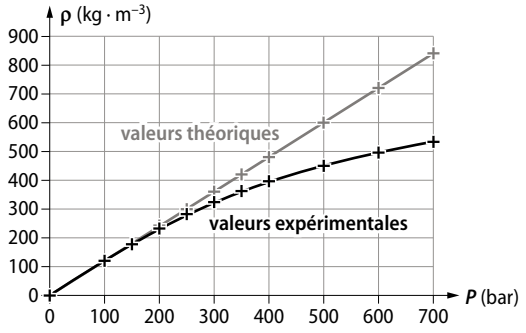
3. a. $\rho_{air} = \dfrac{M_{air}}{V_m}$ et $V_m = \dfrac{\alpha \cdot R \cdot T_0}{P}$.

Soit $\rho_{air} = \dfrac{P \cdot M_{air}}{\alpha \cdot R \cdot T_0}$.

b. D'après la loi du gaz parfait :

$$\rho_{air} = \frac{P \cdot M_{air}}{R \cdot T_0}$$

On obtient les courbes suivantes :



c. Jusqu'à une pression d'environ 200 bars, les deux courbes sont quasiment confondues. La profondeur maximale peut donc être estimée à 200 m. Traditionnellement, les plongées en apnée se font à des profondeurs nettement inférieures à 200 m. Le modèle du gaz parfait peut donc être utilisé.

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 394

1. Proposition de protocole expérimental

Pour étudier cette transformation, on réalise l'expérience dont le montage est représenté sur la photo. On place dans l'erlenmeyer 0,50 g de poudre de zinc et, dans l'entonnoir, 75,0 mL de solution d'acide chlorhydrique de manière à ce que le zinc soit en défaut au cours de la réaction.

$n(\text{Zn}) = \dfrac{0{,}50}{65{,}4} = 7{,}6 \times 10^{-3}$ mol

$n(H_3O^+) = 75{,}0 \times 10^{-3} \times 0{,}5 = 3{,}8 \times 10^{-2}$ mol.

À l'instant $t = 0$ s, on ajoute rapidement la solution d'acide chlorhydrique dans l'erlenmeyer.

On mesure la pression P à cet instant.

La formation de dihydrogène crée une surpression qui s'additionne à la pression de l'air initialement présent. Les valeurs de la pression sont ensuite mesurées à différentes dates par le capteur de pression.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental proposé

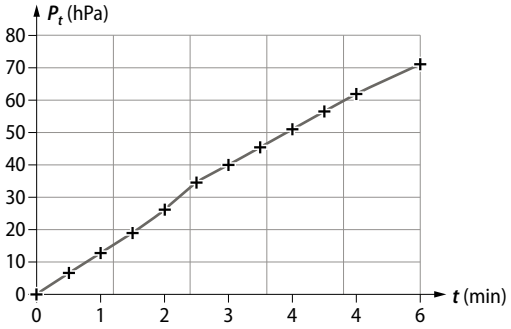
$P_i = 1\,020$ hPa et $\theta_i = 24$ °C.

Les valeurs de la pression, mesurée à différentes dates par le capteur de pression, sont reportées dans le tableau suivant.

t (min)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
P (hPa)	1 020	1 027	1 033	1 039	1 046	1 055

t (min)	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0
P (hPa)	1 060	1 066	1 071	1 077	1 082	1 296

$P_t = P - P_i$. On obtient le graphique suivant :

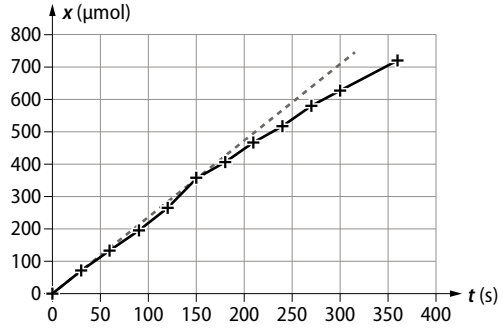


3. Exploitation du résultat obtenu

D'après l'équation, $n(H_2) = x$ et, d'après l'équation d'état du gaz parfait :

$(P - P_i) \cdot V_{gaz} = n(H_2) \cdot R \cdot T$ donc :

$$x = \frac{(P - P_i) \cdot V_{gaz}}{R} \cdot T$$



La vitesse volumique de disparition du zinc est $v = \dfrac{1}{V} \cdot \dfrac{dx}{dt}$. Le volume V de la solution étant constant, alors la vitesse volumique de disparition est proportionnelle à $\dfrac{dx}{dt}$. Ce terme représente le coefficient directeur de la tangente à la courbe représentative de $x = f(t)$ à la date t.

À $t = 0$ s, $\dfrac{dx}{dt} = 2{,}36$ µmol · s^{-1},

donc $v = \dfrac{2{,}36}{75 \times 10^{-3}} = 31{,}5$ µmol · L^{-1} · s^{-1}.

Les quelques sources d'erreurs possibles sont :
– la qualité des mesures de pression et de durées ;
– la mesure de la masse de zinc et de la perte de gaz formé ;
– l'incertitude sur la tangente, etc.

CHAPITRE
16

Manuel p. 396

Premier principe de la thermodynamique

LE PROGRAMME

2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Énergie interne d'un système. Aspects microscopiques	Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.
Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.	Prévoir le sens d'un transfert thermique. Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.
Capacité thermique d'un système incompressible. Énergie interne d'un système incompressible.	Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique. *Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.*
Modes de transfert thermique. Flux thermique. Résistance thermique.	Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement. Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.
Bilan thermique du système Terre-atmosphère. Effet de serre.	Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée. Discuter qualitativement de l'influence de l'albédo et de l'effet de serre sur la température terrestre moyenne.
Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat	Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps. *Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.* **Capacité mathématique :** Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 396

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis les notions, vues en enseignement de spécialité de 1re, d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de pesanteur, ainsi que le théorème de l'énergie cinétique qui relie la variation de l'énergie cinétique au travail de forces.
Dans la situation proposée, il s'agit d'identifier le type d'énergie acquise lors de la phase d'étude et d'identifier son origine. L'approche est qualitative, il n'est pas attendu de calculs.

› Exemple de réponse attendue

La course d'élan se fait sur une piste horizontale, il n'y a donc pas variation de l'énergie potentielle de pesanteur du bobsleigh. Par contre, la course d'élan va modifier sa vitesse et donc son énergie cinétique. L'énergie acquise par le bobsleigh est de l'énergie cinétique.
D'après le théorème de l'énergie cinétique, la variation d'énergie cinétique provient de forces qui travaillent. L'action mécanique qui agit sur le système est l'action des bobeurs qui le poussent sur une certaine distance. Cette action est modélisée par une force qui travaille sur cette distance (la force qui modélise l'action de poussée des bobeurs est dans le sens et la direction du mouvement, il s'agit d'un travail moteur).

› En classe de Terminale

Les élèves découvriront qu'il existe des énergies présentes au niveau microscopique : les énergies cinétiques microscopiques et les énergies potentielles d'interaction microscopiques ; la somme de ces énergies constituant l'énergie propre d'un système, appelée énergie interne.
Quand ils aborderont le premier principe de la thermodynamique pour un système au repos, ils verront qu'un système peut voir son énergie interne varier lors qu'il y a transfert d'énergie entre lui et l'extérieur, notamment sous forme de travail.

SITUATION 2

Dans cette situation, les élèves sont invités à réinvestir la notion d'albédo ; qui a été abordée en enseignement scientifique de 1re.
Le document mis à disposition permet d'avoir la valeur de la puissance surfacique du Soleil reçue au niveau de la Terre et de son atmosphère, ainsi que la puissance surfacique réfléchie par la Terre et son atmosphère.

› Exemple de réponse attendue

L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchie et n'est donc pas absorbée.

$$A = \frac{E_{\text{réfléchie}}}{E_{\text{reçue}}} = \frac{P_{\text{réfléchie}}}{P_{\text{reçue}}} = \frac{102}{342} = 0{,}30$$

La Terre et son atmosphère présentent un albédo $A = 0{,}30$.

› En classe de Terminale

Les élèves verront que l'albédo est à prendre en compte dans l'estimation de la température terrestre moyenne.
L'**activité 3** propose une démarche de type résolution de problème où les élèves sont amenés à déterminer la valeur de la température moyenne terrestre théorique et à expliquer l'écart entre cette valeur théorique et la valeur réelle.

ACTIVITÉS

p. 398

ACTIVITÉ 1

Modes de transfert thermique

Commentaires pédagogiques

Cette activité de découverte permet aux élèves de découvrir par eux-mêmes les différents modes de transfert thermique, de les identifier et de les caractériser.

› Exploitation et analyse

1. Les animations proposées dans les documents 1 et 2 permettent d'observer les mouvements des particules de matière :

- lors d'une convection thermique.

Les particules se déplacent. Elles montent après contact d'une source chaude et redescendent quand elles s'en sont éloignées (c'est ce qu'on appelle le mouvement de convection, qui résulte de la différence de densité entre un fluide chaud et un fluide froid : le premier, qui a une densité plus faible, va monter tandis que le second, qui a une densité plus importante, va descendre). Le transfert thermique se fait donc globalement par mouvement de matière.

- lors d'une conduction thermique.

Les particules ne se déplacent pas, elles vibrent autour de leur position (plus la température augmente, plus les particules vibrent). Le transfert d'énergie thermique se fait de proche en proche. Les vibrations concernent davantage les particules proches de la source de chaleur dans un premier temps, avant de se répandre progressivement aux particules plus éloignées.

2. Comme indiqué dans le document 3, lors d'un rayonnement, l'énergie thermique est transmise sans support matériel et c'est là sa particularité (la convection et la conduction nécessitent un support matériel, il y a respectivement mouvement et vibration de particules).

› Synthèse

Prenons les quatre situations du quotidien présentées dans le document 4 et identifions le (ou les) transfert(s) thermique(s) mis en jeu.

• Situation 1 : une casserole d'eau sur une plaque électrique.
La plaque de cuisson et la casserole sont en contact et le transfert thermique se fait par conduction. De même, l'énergie thermique se propage au sein de la casserole par conduction.
La casserole est en contact avec l'eau qui se trouve au fond de celle-ci, le transfert thermique se fait ici par conduction. Par contre, au sein de l'eau, l'énergie thermique se propage par convection (les particules d'eau ont un mouvement de convection).

• Situation 2 : une pièce chauffée par un radiateur.
Le radiateur est en contact avec l'air de la pièce qui se trouve dans son environnement proche, le transfert thermique se fait ici par conduction. Par contre, au sein de l'air, l'énergie thermique se propage par convection (les particules d'air ont un mouvement de convection).

• Situation 3 : un plat réchauffé dans un four à micro-ondes.
Le micro-ondes émet des ondes électromagnétiques qui font vibrer les particules présentes dans le plat. Le transfert thermique entre le micro-ondes et le plat se fait donc par rayonnement. Au niveau du plat, le transfert thermique se fait par conduction.
Remarque : Comme le plat réchauffé est entouré d'air, on peut citer aussi (comme dans la situation 2) des transferts thermiques par conduction entre le plat et l'air et par convection au sein de l'air.

• Situation 4 : l'eau d'une piscine en été.
En été, l'énergie reçue du Soleil permet de chauffer l'eau de la piscine. Le Soleil émet des ondes électromagnétiques (de la lumière visible par exemple) qui font vibrer les particules présentes dans l'atmosphère ainsi que les particules d'eau présentes dans la piscine.
Le transfert thermique entre le Soleil et l'eau de la piscine se fait donc par rayonnement.
Remarque : il existe aussi des transferts thermiques par conduction entre l'air et la piscine et des transferts thermiques par convection au sein de l'eau de la piscine.

p. 399 **ACTIVITÉ 2**

Capacité thermique

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité a pour objectif de faire travailler expérimentalement les élèves sur des bilans d'énergie. Il s'agit aussi pour eux de découvrir la notion de capacité thermique.
Lors de cette activité expérimentale, les élèves ont à manipuler un calorimètre qui limite les transferts thermiques vers l'extérieur. Ainsi, tous les matériaux introduits dans le calorimètre et le calorimètre lui-même constituent un système au repos, incompressible et n'étant pas le siège de transfert thermique avec l'extérieur, donc un système pour lequel $\Delta U_{syst} = 0$.

› Exploitation et analyse

1. a On réalise le protocole expérimental proposé pour déterminer la capacité thermique du calorimètre.

b. Le calorimètre limitant les transferts thermiques vers l'extérieur, on a un système au repos incompressible qui n'échange pas d'énergie avec l'extérieur sous forme de transfert thermique, donc pour lequel $\Delta U_{syst} = 0$.

$$\begin{aligned}\text{Or } \Delta U_{syst} &= \Delta U_{\text{eau ajoutée}} + \Delta U_{\text{eau présente initialement}} + \Delta U_{calo}\\ &= m_1 \cdot c_{eau} \cdot (T_{finale} - T_c) + m_2 \cdot c_{eau} \cdot (T_{finale} - T_{amb})\\ &\quad + C_{calo} \cdot (T_{finale} - T_{amb})\end{aligned}$$

c. On en déduit que

$$C_{calo} = -c_{eau} \cdot \frac{m_1 \cdot (T_{finale} - T_c) + m_2 \cdot (T_{finale} - T_{amb})}{T_{finale} - T_{amb}}$$

L'ordre de grandeur fréquemment mesuré est $10^2\ \text{J} \cdot \text{°C}^{-1}$.

2. a. On réalise le protocole expérimental proposé pour déterminer la capacité thermique du matériau.

b. Le calorimètre limitant les transferts thermiques vers l'extérieur, on a un système au repos incompressible qui n'échange pas d'énergie avec l'extérieur sous forme de transfert thermique, donc pour lequel $\Delta U_{syst} = 0$.

$$\begin{aligned}\text{Or } \Delta U_{syst} &= \Delta U_{\text{matériau}} + \Delta U_{\text{eau présente initialement}} + \Delta U_{calo}\\ &= m \cdot c_{\text{matériau}} \cdot (T_{finale} - T_c) + m' \cdot c_{eau} \cdot (T_{finale} - T_{amb}) + C_{calo} \cdot (T_{finale} - T_{amb})\end{aligned}$$

c. On en déduit que :

$$c_{\text{matériau}} = -\frac{(m' \cdot c_{eau} + C_{calo}) \cdot (T_{finale} - T_{amb})}{m \cdot (T_{finale} - T_c)}$$

› Conclusion

Capacité thermique massique de différents matériaux :
$c_{\text{brique normale}} = 8 \times 10^2\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$
$c_{\text{béton}} = 9 \times 10^2\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$
$c_{\text{bois}} > 10^3\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$

Le calorimètre utilisé n'est pas idéal. Il existe donc des échanges thermiques avec l'extérieur, ce qui conduit à des résultats expérimentaux entachés d'incertitudes de mesures importantes.

p. 400 ACTIVITÉ 3

Température terrestre moyenne

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet de découvrir que tout corps de température non nulle perd de l'énergie par rayonnement et que le lien entre cette température et le flux d'énergie est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann.

Grâce à cette loi, il est possible de déterminer la température moyenne d'une planète en considérant néanmoins l'influence d'autres paramètres comme l'albédo et l'effet de serre.

Les notions d'albédo et d'effet de serre ont été abordées en enseignement scientifique de classe de 1re.

› Questions préliminaires

1. $F = \sigma \cdot T^4$

Donc $\sigma = \dfrac{F}{T^4}$.

On en déduit l'unité de σ : $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$.

2. a. D'après le document 1, $F = 1\,368\ W \cdot m^{-2}$ et $F' = 342\ W \cdot m^{-2}$.

Donc $\dfrac{F}{F'} = 4$.

b. Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de la Terre :

$\Phi = F \cdot$ surface (disque) $= F' \cdot$ surface(Terre)

Donc $F \cdot \pi \cdot r^2 = F' \cdot 4\pi \cdot r^2$ (d'après la figure du document 1)

Donc $\dfrac{F}{F'} = 4$.

› Problématique

Comme on peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable, et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égal au flux thermique émis par la Terre :

$\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$

Donc : $\sigma \cdot T^4 = F'$

Soit $T = \sqrt[4]{\dfrac{F'}{\sigma}} = \sqrt[4]{\dfrac{342}{5{,}67 \times 10^{-8}}} = 279$ K.

Cela correspond à 6 °C. La Terre n'est pas un « corps noir ». L'albédo (la Terre réfléchit vers l'espace 30 % de l'énergie qu'elle reçoit) et l'effet de serre (phénomène de réchauffement d'une planète) influencent la valeur de la température terrestre moyenne.

p. 401 ACTIVITÉ 4

Loi de refroidissement de Newton

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

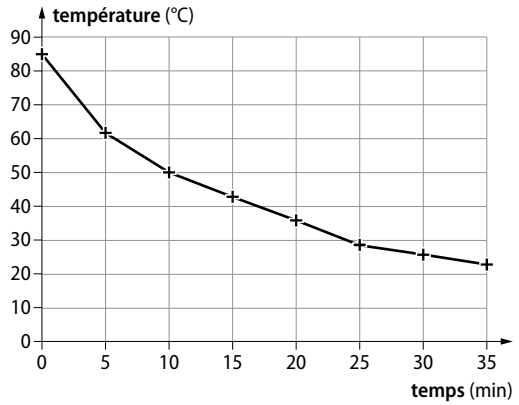
Cette activité a pour objectif de découvrir la loi thermique de Newton. La température d'un échantillon d'eau initialement chauffé laissé à l'air libre est mesurée à intervalles de temps réguliers au cours de son refroidissement. Ce suivi de température est facilité par l'utilisation d'un capteur de température relié à un ordinateur.

On remarque que la température du corps laissé à l'air libre tend vers la température ambiante.

La courbe d'évolution de la température est modélisée à l'aide d'un grapheur par une exponentielle décroissante, en cohérence avec la loi de Newton donnée. Cette loi permet au final de prédire la température du corps à chaque instant, ou la durée de refroidissement de ce corps.

› Mesures

1. Acquisition de l'évolution de la température d'un échantillon d'eau laissé à l'air libre en fonction du temps pour une température ambiante de 20 °C :



2. a. Modélisation : $T(t) = 65 \cdot e^{-0{,}08t} + 20$

b. D'après l'expression qui découle de la relation de Newton :

$T = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$

Par correspondance entre les deux expressions, on a :

- $T_{amb} = 20$ °C ; $\gamma = 0{,}08\ min^{-1}$;
- $T_0 - T_{amb} = 65$ donc $T_0 = 85$ °C.

3. a. T (15 min) $= 65 \times e^{-0{,}08 \times 15} + 20 = 40$ °C

Sur le graphe expérimental, on lit une valeur proche.

b. On cherche la durée nécessaire pour que l'eau atteigne une température supérieure de 1 °C à la température ambiante, soit 21 °C.

$21 = 65 \times e^{-0{,}08t} + 20$

Donc $1 = 65 \times e^{-0,08t}$, donc :

$$t = \frac{\ln 65}{0,08} = 52 \text{ min}$$

› Conclusion

La température d'un corps laissé à l'air libre diminue sous forme d'une exponentielle décroissante.
Dans le cas où la différence de température initiale entre l'eau et l'air est deux fois plus faible que précédemment, soit $T'_0 = \frac{65}{2}$:

$$t' = \frac{\ln \frac{2}{65}}{-0,08} = 43 \text{ min}$$

Si la différence de température initiale entre le corps et l'air est deux fois plus faible, la durée la durée de refroidissement n'est pas deux fois plus courte.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel p. 408

1 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car c'est l'énergie mécanique qui est égale à $E_c + E_{pp}$.
La proposition C est une bonne réponse.

2 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car c'est le flux thermique qui s'exprime en watt
La proposition C est une bonne réponse.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, pour un système au repos, $E_c = 0$ donc :
$E_{total} = E_{pp} + U$.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, pour un système au repos :
$\Delta E_c + \Delta E_{pp} = 0$ donc $\Delta E_{tot} = \Delta U$.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car, pour un système incompressible, $W = 0$ donc $\Delta U = W + Q = Q$.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car, pour un système incompressible, $W = 0$ donc $\Delta U = W + Q = Q$.

5 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'expression est incorrecte : le transfert thermique est proportionnel à une différence de température, pas de temps.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la conduction est un transfert thermique par contact.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le flux thermique est le transfert thermique qui s'écoule par unité de temps.

7 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le transfert thermique est orienté de la source chaude vers la source froide.
La proposition C est une bonne réponse.

8 Les propositions A et B ne sont pas des bonnes réponses car le flux thermique est le transfert thermique qui s'écoule par unité de temps et est, par définition, égal à $\frac{Q}{\Delta t}$.
La proposition C est une bonne réponse.

9 La proposition A est une bonne réponse.
Les propositions B et C ne sont pas des bonnes réponses car, à chaque fois, l'expression est incorrecte.

10 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car l'expression est incorrecte.
La proposition C est une bonne réponse.

11 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

12 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

13 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

Acquérir les bases p. 409

› 1. Premier principe de la thermodynamique

14 Cette eau peut être le siège d'une variation d'énergie sans que sa position ou sa vitesse soient modifiées. En effet, il existe une énergie propre à cette eau appelée énergie interne. Elle correspond à la somme de toutes les énergies qui existent, à l'intérieur de ce système, au niveau microscopique du fait de ses constituants : énergies cinétiques microscopiques et énergies potentielles microscopiques.

15 **1. a.** L'énergie interne d'un système est l'énergie propre du système. Elle correspond à la somme de toutes les énergies qui existent, à l'intérieur de ce système, au niveau microscopique du fait de ses constituants.

b. Les énergies cinétiques microscopiques et les énergies potentielles microscopiques sont les contributions microscopiques de l'énergie interne d'un système.

2. a. Les énergies cinétiques microscopiques sont liées à l'agitation thermique des particules qui constituent le système.

b. On associe ces énergies cinétiques microscopiques à la température.

3. a. Les énergies potentielles d'interaction sont liées aux interactions entre les particules qui constituent le système. Elles peuvent être des interactions intramoléculaires ou intermoléculaires.

b. Dans le cas d'un gaz comme l'air, les particules qui le constituent sont éloignées (comme pour tout gaz), donc les interactions intermoléculaires sont réduites et la contribution des énergies potentielles microscopiques à l'énergie interne est faible.

16 **1.** Les deux systèmes sont dans des états physiques différents (liquide ou gaz). Dans le liquide, les molécules d'eau sont très rapprochées : les énergies potentielles d'interaction prédominent devant les énergies cinétiques microscopiques. Dans le cas de la vapeur d'eau, c'est l'inverse.

2. Les deux systèmes ont la même température, donc les mêmes énergies cinétiques microscopiques. Dans l'eau liquide, les interactions intermoléculaires sont plus importantes que dans la vapeur car les molécules sont plus rapprochées. L'eau liquide compte donc en plus une importante énergie d'interaction : elle possède l'énergie interne la plus élevée.

17 **1.** Faux. Il faut ajouter son énergie interne U.

2. Vrai.

3. Faux. L'énergie n'est pas détruite mais transférée du système au milieu extérieur.

18 **1.**

2. a. Le système est au repos : sa position ou sa vitesse ne sont pas modifiées.

$\Delta E_{tot} = \Delta U$

D'après le premier principe de la thermodynamique :

$\Delta U = W + Q$

b. ΔU *:* terme correspondant à la variation de l'énergie du système.

W, Q : termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.

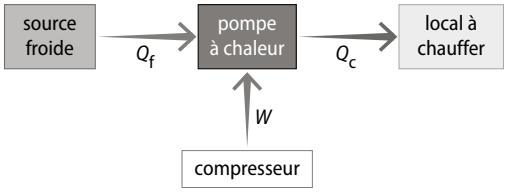
c. $\Delta U = W + Q$

W est reçu par le système, donc $W > 0$.

Q est cédé par le système, donc $Q < 0$.

$\Delta U = 10 - 50 = -40$ kJ

19 **1.**



2. Le système est au repos car sa position ou sa vitesse ne sont pas modifiées.

$\Delta E_{tot} = \Delta U$

D'après le premier principe de la thermodynamique :

$\Delta U = W_f + Q_f + Q_c$

W et Q_f sont reçus par le système donc $W > 0$ et $Q_f > 0$.

Q_c est cédé par le système donc $Q_c < 0$.

› 2. Transferts et flux thermiques

20 **1.** $\Delta U = \rho \cdot V \cdot c_a \cdot (T_2 - T_1)$

AN : $\Delta U = 1{,}3 \times 400 \times 1\,000 \times (15{,}6 - 19{,}0)$

$= -1{,}8 \times 10^6$ J

2. $\Delta U < 0$ traduit une perte d'énergie de l'habitation.

21 **1.** $\Delta U_{eau} = Q = \rho_{eau} \cdot V \cdot c_{eau} \cdot \Delta\theta$

$\Delta U_{eau} = 1{,}00 \times 0{,}250 \times 4\,180 \times (90 - 10)$

$= 8{,}4 \times 10^4$ J

2. On suppose que le four à micro-ondes est bien isolé. Toute l'énergie électrique est utilisée pour chauffer l'eau.

$W_e = P \cdot \Delta t = \Delta U_{eau}$

Donc $\Delta t = \dfrac{\Delta U_{eau}}{P} = \dfrac{8{,}4 \times 10^4}{900} = 93$ s $= 1$ min 33 s

22 Il existe différents modes de transferts thermiques pour obtenir de l'eau chaude selon la façon dont l'énergie est transférée :

– le Soleil transfère de l'énergie par rayonnement sans support de matière ;

– l'air réchauffé par le Soleil transfère de l'énergie par conduction (support matériel mais non-déplacement de matière) au sac plastique qui, lui-même, transfère de l'énergie par conduction à l'eau ;

– l'eau à l'intérieur du sac plastique s'échauffe : l'énergie est transférée par convection au sein du liquide. L'eau dont la température est plus élevée monte vers la surface et celle de température moindre descend (il y a déplacement de matière).

23 **1.** Pour le système {café}, en l'absence de changement d'état et de transformation chimique :
$\Delta U_{café} = \rho_{eau} \cdot V \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$
AN : $\Delta U_{café} = 1{,}0 \times 1{,}0 \times 4{,}18 \times (52 - 60) = -33$ kJ.

2. En supposant que la bouteille thermos est parfaitement isolée :
$\Delta U_{café+thermos} = 0$

3. $\Delta U_{café+thermos} = \Delta U_{café} + \Delta U_{thermos} = 0$
Donc $\Delta U_{thermos} = -\Delta U_{café} = 33$ kJ.

24 **1.** Le transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide, donc ici de l'intérieur vers l'extérieur.

2. On a $\Phi = \dfrac{\Delta T}{R_{th}}$ donc $R_{th} = \dfrac{\Delta T}{\Phi}$.

Puisque Φ est le même pour les vitres et pour la lame d'air, on peut comparer directement les résistances thermiques à partir de ΔT. Ainsi, on voit que, pour le verre, ΔT est plus petit. La résistance thermique du verre est donc plus faible que celle de la lame d'air.

3. La résistance thermique de la lame d'air est supérieure à celle du verre, donc la lame d'air est un meilleur isolant thermique.

25 **1. a.** Le transfert thermique s'effectue de la source chaude vers la source froide, donc de la maison ($\theta_2 = 20$ °C) vers le grenier ($\theta_1 = 5{,}0$ °C) (et bien sûr vers l'extérieur).

b. $\Phi = \dfrac{\theta_2 - \theta_1}{R}$

AN : $\Phi = \dfrac{20 - 5{,}0}{7{,}5 \times 10^{-3}} = 2{,}0 \times 10^3$ W $= 2{,}0$ kW

2. a. Un bon choix de matériau pour un isolant thermique est un matériau qui a une conductivité thermique λ faible. Le polystyrène extrudé, qui a la conductivité thermique la plus faible, est un bon isolant thermique.

b. $R_{tot} = R_{sol} + R_{isolant}$
Donc $R_{isolant} = R_{tot} - R_{sol} = 7{,}5 \times 10^{-2} - 7{,}5 \times 10^{-3}$
$= 6{,}8 \times 10^{-2}$ K · W^{-1}

c. On doit avoir : $R_{isolant} = \dfrac{e}{\lambda \cdot S} \geqslant 6{,}8 \times 10^{-2}$ K · W^{-1}.
Donc $e \geqslant 6{,}8 \times 10^{-2} \times 0{,}033 \times 80 = 0{,}18$ m.
L'épaisseur minimale du panneau doit être de 18 cm

› 3. Deux lois thermiques

26 **1. a.** L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchie et n'est donc pas absorbée. La Terre et son atmosphère présentent un albédo $A = 0{,}30$, ce qui signifie que la Terre réfléchit vers l'espace 30 % de l'énergie qu'elle reçoit.
L'albédo a pour conséquence que le flux thermique reçu du Soleil à la surface de la Terre va diminuer.
b. La température est liée au flux thermique reçu, donc celle-ci est diminuée avec l'albédo.

2. a. Les gaz de l'atmosphère absorbent environ 20 % du rayonnement émis par le sol. Ce phénomène s'appelle l'effet de serre.
b. Son effet est d'augmenter la température moyenne terrestre.

27 **1.** On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égal au flux thermique émis par la Terre :
$\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$

2. a. $F = \sigma \cdot T^4$ donc $\sigma = \dfrac{F}{T^4}$.
F est en W · m^{-2} donc σ est en W · m^{-2} · K^{-4}.
b. $\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$
Donc $\sigma \cdot T^4 = F$
Soit $T = \sqrt[4]{\dfrac{F}{\sigma}} = \sqrt[4]{\dfrac{342}{5{,}67 \times 10^{-8}}} = 279$ K
Cela correspond à 6 °C.

3. Cette valeur diffère de la valeur théorique car la Terre n'est pas un « corps noir » : elle réfléchit vers l'espace une partie (30 %) de l'énergie qu'elle reçoit (albédo de 0,30) et les gaz de l'atmosphère absorbent une partie (environ 20 %) du rayonnement émis par le sol (effet de serre).

28 **1.** Le système (café) cède de l'énergie à l'environnement.

2. $T_{amb} = 25$ °C

3. La solution générale de l'équation différentielle est :
$T(t) = A \cdot e^{\gamma \cdot t} + B$
Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$ donc $B = T_{amb}$.
À $t = 0$ s, $T = T_0$ donc $T_0 = A + T_{amb}$ donc $A = T_0 - T_{amb}$.
Donc :
$T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{\gamma \cdot t} + T_{amb}$
D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :
$T(t) = (75 - 25)e^{\gamma \cdot t} + 25$
Donc :
$T(t) = 50e^{\gamma \cdot t} + 25$

4. a. Après 5 minutes, le café est à 50 °C.
Donc $T(5) = 50e^{\gamma \times 5} + 25 = 50$

Donc $e^{5\gamma} = \dfrac{1}{2}$.

Donc $5\gamma = \ln \dfrac{1}{2}$.

Donc $\gamma = -\dfrac{\ln 2}{5}$.

b. On en déduit l'expression générale de $T(t)$:

$T(t) = 50e^{-\frac{\ln 2}{5}t} + 25$

Faire le point avant d'aller plus loin p. 411

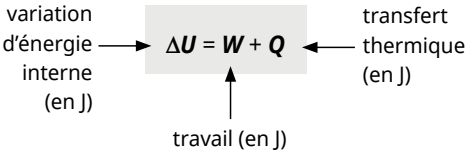
◗ ***Citer les énergies microscopiques qui contribuent à l'énergie interne du système.***

Les énergies cinétiques microscopiques sont liées à l'agitation thermique des particules qui constituent le système. Elles augmentent avec la température du système.

Les énergies potentielles d'interaction sont liées aux interactions entre les particules qui constituent le système. Elles peuvent être des interactions intramoléculaires ou intermoléculaires

◗ ***Écrire le premier principe de la thermodynamique en explicitant chaque grandeur et son unité.***

Le premier principe de la thermodynamique indique que si un système fermé au repos a son énergie qui varie, c'est qu'il échange avec l'extérieur de l'énergie soit sous forme de travail (W), soit sous forme de transfert thermique (Q) :



◗ ***Citer les modes de transferts thermiques et définir chacun d'entre eux.***

La conduction est un transfert thermique par contact entre le système et l'extérieur.

La convection est un transfert thermique entre le système et l'extérieur par mouvement de matière au sein du système.

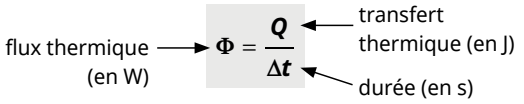
Le rayonnement est un transfert thermique qui se fait par le biais d'une onde électromagnétique.

◗ ***Effectuer un bilan d'énergie pour une bouilloire électrique.***

W_e correspond à l'énergie reçue du réseau électrique par une bouilloire et l'énergie fournie à l'eau par celle-ci. Pour la bouilloire : $W_e > 0$ et $Q < 0$.

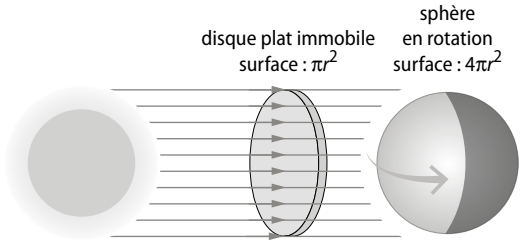
◗ ***Écrire la relation qui relie le flux thermique et le transfert thermique en explicitant chaque grandeur et son unité.***

Le flux thermique Φ correspond au transfert thermique Q qui s'écoule entre deux milieux par unité de temps :



◗ ***Expliciter les étapes qui permettent d'estimer la température moyenne terrestre à partir de la loi de Stefan-Boltzmann.***

Le flux thermique reçu F au sommet de l'atmosphère terrestre par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (ou constante solaire) est connu.



Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de la Terre :

$\Phi = F \cdot \text{surface(disque)} = F' \cdot \text{surface(Terre)}$

D'où $F \cdot \pi \cdot r^2 = F' \cdot 4\pi \cdot r^2$.

Donc $F' = F/4$.

On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable, et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égal au flux thermique émis par la Terre :

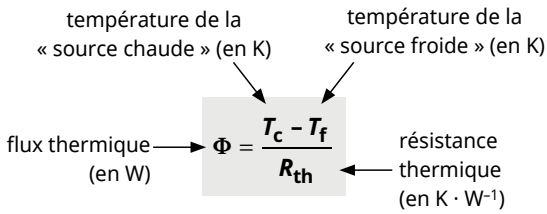
$\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$

Donc, d'après la loi de Stefan-Boltzmann, $\sigma \cdot T^4 = F'$.

Soit $T^4 = \frac{F'}{\sigma}$.

◗ ***Écrire la relation qui lie le flux thermique et la variation de température d'un système en explicitant chaque grandeur et son unité.***

Le flux thermique Φ est lié à la différence de température $T_c - T_f$ entre les deux milieux pour lesquels le transfert thermique se fait et à la résistance thermique R_{th} par la relation :



◗ ***En utilisant la loi de Newton pour de l'eau fraîche qui se réchauffe à température ambiante, on a trouvé l'expression : $T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$. Quelles données expérimentales permettent de déterminer A et B ?***

On peut déterminer A et B en connaissant la température initiale de l'eau fraîche T_0 et la température ambiante T_{th}.
Quand t tend vers l'infini, $T = T_{th}$ donc $B = T_{th}$.
À $t = 0$ s, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{th}$ donc $A = T_0 - T_{th}$.
Donc :
$T(t) = (T_0 - T_{th}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{th}$

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 412 et 413

30 **1.** Le sauna reçoit une énergie $\Delta E = P \cdot \Delta t_{chauffe}$.

AN : $\Delta E = 7{,}5 \times 60 = 4{,}5 \times 10^2$ kJ

2. Cette énergie est perdue en 5,0 minutes car la température est constante dans le sauna.

La puissance qui traverse la paroi est donc :

$$\Phi = \frac{\Delta E}{\Delta t_{chauffe}}$$

AN : $\Phi = \dfrac{450 \times 10^2}{300} = 1{,}5 \times 10^3$ W $= 1{,}5$ kW

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Phi}$$

AN : $R_{th} = \dfrac{80 \times 18}{1\,500} = 4{,}1 \times 10^{-2}$ K · W^{-1}

32 **1.** $T_{amb} = -5$ °C

2. La solution générale de l'équation différentielle (qui découle de la loi de Newton) est :
$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$, donc $B = T_{amb}$.
À $t = 0$ s, $T = T_0$ donc $T_0 = A + T_{amb}$, donc $A = T_0 - T_{amb}$.

Donc :
$T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :
$T(t) = (20 - (-5)) \cdot e^{-\gamma \cdot t} - 5$

Donc $T(t) = 25e^{-\gamma \cdot t} - 5$.

3. a. À $t = 30$ min, $T(30) = 15 = 25e^{-30\gamma} - 5$.

Donc $25e^{-30\gamma} = 20$.

Donc $e^{-30\gamma} = \dfrac{4}{5}$.

Donc $-30\gamma = \ln \dfrac{4}{5}$.

Donc $\gamma = \dfrac{\ln \frac{5}{4}}{30}$.

b. On en déduit l'expression générale de $T(t)$:

$$T(t) = 25e^{-\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} t} - 5$$

4. On cherche le temps t pour lequel on a $T(t) = 37$ °C.

$25e^{-\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} \cdot t} - 5 = 37$ soit $25e^{-\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} \cdot t} = 42$ soit

$$e^{-\frac{\ln \frac{5}{4}}{30} \cdot t} = \frac{42}{25}$$

D'où $-\dfrac{\ln \frac{5}{4}}{30} \cdot t = \ln \dfrac{42}{25}$

$$t = -30 \times \frac{\ln \frac{42}{25}}{\ln \frac{5}{4}} = -70 \text{ min} = -1 \text{ h } 10$$

On en déduit l'heure du crime :
2 h 20 – 1 h 10 = 1 h 10 du matin.

S'entraîner pour maîtriser

p. 414

33 **1. a.** Il y a de la conduction entre le tube en métal et l'air présent dans le réfrigérateur, ainsi qu'un phénomène de convection de l'air à l'intérieur du réfrigérateur.
b. Il est préférable de le placer en hauteur car l'air chaud a tendance à monter et l'air froid à descendre par convection (car l'air froid est plus dense que l'air chaud).

2. a. Le transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide, donc de l'extérieur vers l'intérieur du réfrigérateur.

b. $\Phi = \dfrac{\Delta T}{R} = \dfrac{16}{0{,}89} = 18$ W

c. 1 an $= 365{,}25 \times 24 = 8\,766$ h

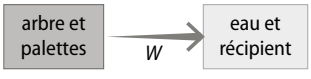
$\Delta U = Q = \Phi \cdot \Delta t = 18 \times 8\,766$
$= 1{,}6 \times 10^5$ Wh $= 1{,}6 \times 10^2$ kWh

34 **1.** Lorsque l'eau est agitée, on mesure une élévation de la température de l'eau. Cela s'explique au niveau microscopique car l'énergie cinétique microscopique de l'eau augmente.

2. Quand on actionne la tige, il y a transfert d'énergie par travail de la force de la palette sur l'eau.

3. Le système {eau + récipient} est immobile au départ et à la fin, donc seule l'énergie interne varie.

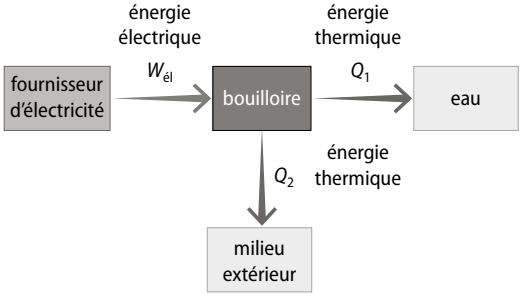
4.



$\Delta U = W$

5. Cette expérience montre que le travail d'une force est un mode de transfert thermique. Il remet donc en cause la théorie du calorique.

35 **1.**



2. $\eta = \dfrac{E_{utile}}{E_{dépensée}} = \dfrac{Q_1}{W_{él}} = \dfrac{\rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T}{P \cdot \Delta t}$

AN : $\eta = \dfrac{1{,}0 \times 0{,}40 \times 4{,}18 \times 10^3 \times (85 - 18)}{1\,500 \times 80}$

$= 0{,}93 = 93\ \%$

36 **1. a.** La température de l'eau augmente, donc son agitation thermique moléculaire (ou énergie cinétique microscopique) augmente. Son énergie interne va ainsi augmenter.

b. Pour le système {eau}, $\Delta U_{eau} = m_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$, où ΔT est la variation de la température de l'eau.

AN : $\Delta U_{eau} = 10{,}0 \times 10^3 \times 4{,}18 \times 10^3 \times (27 - 10)$

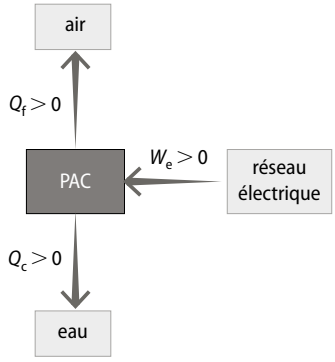
$= 7{,}1 \times 10^8$ J

c. La piscine est couverte et n'échange pas d'énergie avec l'extérieur, donc l'augmentation de l'énergie interne de l'eau provient du flux thermique reçu de la PAC :

$Q_{PAC} = \Delta U_{eau} = 7{,}1 \times 10^8$ J

2. a. La source froide est l'air qui reste à température constante. La source chaude est la piscine dont la température va augmenter.

b.



c. Coefficient énergétique :

$\eta = \dfrac{Q_{PAC}}{W_e} = \dfrac{7{,}1 \times 10^8}{2{,}4 \times 10^8} = 3{,}0$

d. Pour obtenir la même température par un chauffage direct sans source froide, le système aurait dû prélever $W_e' = Q_{PAC} = 7{,}1 \times 10^8$ J directement au réseau électrique.

e. La PAC est 3 fois plus performante qu'un système de chauffage électrique classique.

37 Tout corps de température non nulle perd de l'énergie par rayonnement. La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface F (en W · m^{-2}) d'un objet et la température T (en K) de l'objet considéré comme un « corps noir », objet idéal qui émet sous forme d'un rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit :

$F = \sigma \cdot T^4$ donc $T^4 = \dfrac{F}{\sigma}$.

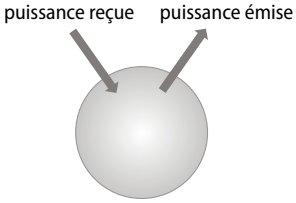
AN : $T^4 = \dfrac{800}{5{,}67 \times 10^{-8}} = 1{,}41 \times 10^{10}$ K^4

Donc $T = 345$ K $= 72$ °C.

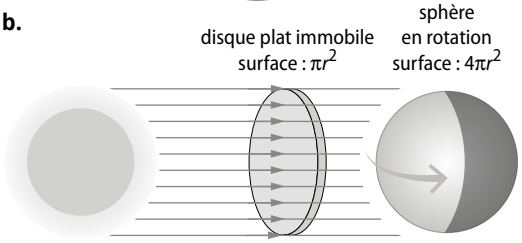
La différence de température vient du fait que le fond du panneau n'est pas un « corps noir » et ne réémet donc pas toute l'énergie qu'il reçoit.

38 *Cet exercice est en bleu sur le manuel élève et corrigé pour les élèves sur le site ressources.*

1. a.



b.



Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de Vénus :

$\Phi = F \cdot \text{surface(disque)} = F' \cdot \text{surface(Vénus)}$

Donc $F \cdot \pi \cdot r^2 = F' \cdot 4\pi \cdot r^2$

Donc $F' = \dfrac{F}{4} = \dfrac{2\,800}{4} = 700$ W · m^{-2}

2. a. L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par Vénus qui est réfléchie et n'est donc pas absorbée.

b. L'albédo de Vénus (0,70) est plus important que celui de la Terre (0,30). Cette différence vient du fait que l'atmosphère de Vénus est plus épaisse.

c. Le flux thermique par unité de surface réellement absorbé par Vénus est

$F'' = (1 - 0{,}70) \cdot F' = 210$ W · m^{-2}

d. $\Phi_{\text{réémis par Vénus}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$

Donc : $\sigma \cdot T^4 = F''$.

Donc : $T^4 = \dfrac{F''}{\sigma} = \dfrac{210}{5{,}67 \times 10^{-8}}$.

Soit $T = 247$ K, ce qui correspond à –26 °C.

e. Vénus n'est pas un « corps noir » et l'écart constaté provient aussi de l'existence de l'effet de serre d'autant plus accentué que l'atmosphère de Vénus est dense.

3. Vénus et la Terre possèdent une atmosphère. Elles ont toutes deux un albédo et sont soumises à l'effet de serre. Ces phénomènes sont accentués pour Vénus dont l'atmosphère est dense.

39 **1. a.** La courbe obtenue a l'allure d'une exponentielle décroissante.

b. La température ambiante est de 20 °C.

c. La température initiale du café est de 100 °C.
Au bout de 10 min, sa température est de 50 °C.
Au bout de 30 min, elle est de 22 °C.

2. a. La solution générale de l'équation différentielle est :

$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$, donc $B = T_{amb}$.

À $t = 0$ s, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{amb}$, donc $A = T_0 - T_{amb}$.

Donc : $T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$.

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$T(t) = (100 - 20) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$

Donc : $T(t) = 80 \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$.

b. $T(20) = 30$, donc $80 \times e^{-\gamma \times 20} + 20 = 30$.

Donc $e^{-20\gamma} = \frac{1}{8}$ soit $-20\gamma = \ln\frac{1}{8}$.

Donc $\gamma = \frac{\ln 8}{20}$.

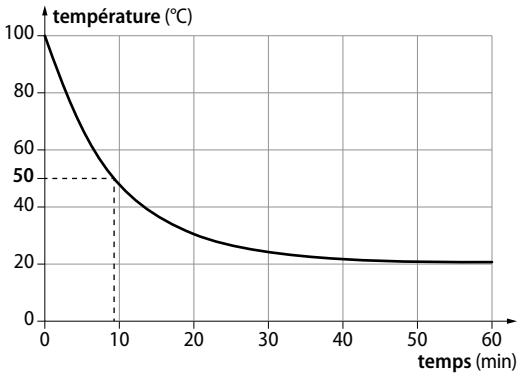
c. On cherche t pour lequel on a $T(t) = 50$ °C.

Donc $80e^{-\frac{\ln 8}{20} \cdot t} + 20 = 50$. Donc $e^{-\frac{\ln 8}{20} \cdot t} = \frac{3}{8}$.

Donc $-\frac{\ln 8}{20} \cdot t = \ln\frac{3}{8}$.

Donc $t = 20 \times \frac{\ln\frac{8}{3}}{\ln 8} = 9{,}4$ min.

Cette valeur est cohérente avec le graphique :



40 **1. a.** Le type de régression à choisir est l'exponentiel (il s'agit d'une exponentielle décroissante).

b. Il peut être judicieux de forcer ici l'ordonnée à l'origine, puisque la température initiale de l'eau chaude est connue. Sa valeur est de 70 °C.

2. Expression générale de l'exponentielle décroissante :

$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$, donc $B = T_{amb}$.

À $t = 0$ s, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{amb}$, donc $A = T_0 - T_{amb}$.

Donc : $T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$.

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$T(t) = (70 - 20) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$

Donc $T(t) = 50e^{-\gamma \cdot t} + 20$.

On a $T(50) = 50 \times e^{-\gamma \times 50} + 20 = 40$.

Donc $e^{-\gamma \times 50} = \frac{2}{5}$.

$-50\gamma = \ln\frac{2}{5}$.

$\gamma = \frac{\ln\frac{5}{2}}{50} \approx 0{,}018$.

Donc $T(t) = 50 \cdot e^{-0{,}018 \cdot t} + 20$.

41 Il existe un écart entre le modèle retenu et la courbe expérimentale car il existe une incertitude sur la mesure de la température et sur la mesure du temps.

Les valeurs correspondant aux grandeurs de l'expression du modèle $T(t) = (T_0 - T_{env}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{env}$ doivent encore être ajustées (le logiciel le permet d'après la copie d'écran)

42 **Exemple d'exposé oral**

L'acquisition expérimentale qui a été faite est un suivi d'évolution de la température d'un **système** au cours du temps. La courbe en exponentielle décroissante traduit un refroidissement (de 22 °C initialement à 0 °C) qui suit la **loi de refroidissement de Newton**. La température initiale du système est de 20 °C et la **température du thermostat** est de 0 °C.

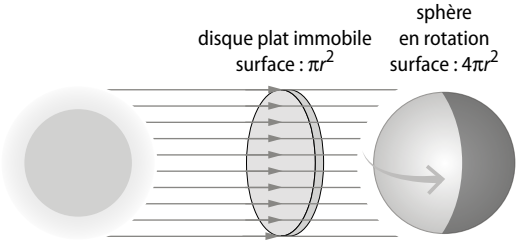
Pour obtenir une telle acquisition, il est possible d'utiliser une sonde de température reliée à un dispositif d'acquisition lui-même relié à un ordinateur muni d'un tableur-grapheur. Pour obtenir un thermostat à 0 °C, on peut utiliser une eau glacée.

Si la température du système diminue, cela signifie que le système perd de l'énergie interne (les énergies cinétiques microscopiques diminuent car l'**agitation thermique** diminue). Comme il n'y a pas de force qui travaille ici, cette énergie interne est perdue, d'après le **premier principe de la thermodynamique**, sous forme d'un **transfert thermique**

vers le thermostat. Ce transfert thermique se fait par **conduction** (il n'y a pas de déplacement de matière).
L'équation différentielle qui régit l'évaluation observée est du type :
$\frac{dT(t)}{dt} = -\gamma \cdot (T(t) - T_{th})$, avec γ constante.
La solution générale de cette équation différentielle est :
$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$
Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$, donc $B = T_{amb}$.
À $t = 0$ s, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{amb}$, donc $A = T_0 - T_{amb}$.
Donc : $T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$.
D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :
$T(t) = (22 - 0) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 0$
Donc $T(t) = 22e^{-\gamma \cdot t}$.
On a $T(1) = 22e^{-\gamma} = 8{,}5$.
$e^{-\gamma} = \frac{8{,}5}{22}$
$\gamma = \ln \frac{22}{8{,}5}$
$\gamma = \ln \frac{22}{8{,}5} = 0{,}95$
Donc $T(t) = 22e^{-0{,}95 \cdot t}$.

43 Exemple d'exposé oral

• *Détermination théorique de la température moyenne terrestre*
Le flux thermique reçu au sommet de l'atmosphère terrestre par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (ou constante solaire) est connu. Il vaut en moyenne $F = 1\,368$ W · m^{-2}.



Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de la Terre :
$\Phi = F \cdot \text{surface(disque)} = F' \cdot \text{surface(Terre)}$
Donc $F \cdot \pi \cdot r^2 = F' \cdot 4\pi \cdot r^2$.
Donc $F' = \frac{F}{4} = 342$ W · m^{-2}.
Tout corps de température non nulle perd de l'énergie par rayonnement. La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface d'un objet et la température de l'objet considéré comme un « corps noir », objet idéal qui émet sous forme d'un rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit :
$\sigma \cdot T^4 = F'$, où σ est la constante de la loi de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W · m^{-2} · K^{-4}.
On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égal au flux thermique émis par la Terre :
$\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{reçu du Soleil}}$
Donc $\sigma \cdot T^4 = F'$.
Soit $T = 279$ K, ce qui correspond à 6 °C.

• *Paramètres à intégrer au modèle pour s'approcher de la valeur réelle :*
Cette valeur diffère de la valeur théorique car la Terre n'est pas un « corps noir » : elle réfléchit vers l'espace 30 % de l'énergie qu'elle reçoit. La Terre et son atmosphère présentent un albédo $A = 0{,}30$.
De plus, les gaz de l'atmosphère absorbent environ 20 % du rayonnement émis par le sol : c'est l'effet de serre. L'effet de serre est un phénomène naturel de réchauffement d'une planète, provoqué par des gaz de son atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol.

Développer ses compétences p. 417

44 › Questions préliminaires

1. $\Delta U = m \cdot c_{eau} \cdot \Delta T = \rho_{eau} \cdot V \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$
$\Delta U = 1{,}0 \times 1{,}9 \times 4{,}18 \times (-1) = -8$ kJ.

2. D'après les résultats de l'expérience, le système {cruche + eau} a perdu (3 550 – 3 300) g en 6 h. Donc la valeur de la masse d'eau du système qui se vaporise au cours du temps en gramme par heure est de $\frac{3\,550 - 3\,300}{6} = 42$ g · h^{-1}.

3. • Zone 1 : la température diminue.
L'énergie interne diminue. L'énergie cédée à l'extérieur par vaporisation de l'eau est plus importante que l'énergie reçue de l'extérieur par contact de l'air.
• Zone 2 : la température est constante.
L'énergie interne est constante. L'énergie cédée à l'extérieur par vaporisation de l'eau est égale à l'énergie reçue de l'extérieur par contact de l'air.

› Le problème à résoudre
Au bout d'une heure, 42 g d'eau se sont évaporés.
L'énergie cédée à l'extérieur par vaporisation de l'eau est donc :
$Q_1 = m_{eva} \cdot L_V = 42 \times 10^{-3} \times 2{,}4 \times 10^3 = 1{,}0 \times 10^2$ kJ
Si l'on néglige l'énergie reçue de l'extérieur, alors l'énergie interne du système {cruche + eau} a diminué d'autant. Or, au bout d'une heure, la température du système a diminué de 21 – 16,5 = 4,5 °C.
$\Delta U = C_{cruche} \cdot \Delta T + \rho_{eau} \cdot V \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$

$\Delta U = (C_{cruche} + \rho_{eau} \cdot V \cdot c_{eau}) \cdot \Delta T$

$\Delta U = (2{,}1 + 1{,}0 \times 1{,}9 \times 4{,}18) \times 4{,}5 = 45$ kJ

ΔU est bien plus faible en réalité, donc on ne peut pas négliger l'énergie reçue de l'extérieur.

45 › Questions préliminaires

1. Conduction : transfert thermique dans un milieu matériel sans transport de matière.

Convection : transfert thermique dans un milieu matériel avec transport de matière.

Rayonnement : transfert thermique sans milieu matériel.

2. $R_{th}(\text{toit}) = R_{\text{laine de chanvre}} + R_{\text{terre cuite}}$

$R = \dfrac{e}{\lambda \cdot S}$

Donc $R_{th}(\text{toit}) = \dfrac{0{,}100}{0{,}04 \times 115} + \dfrac{0{,}040}{0{,}60 \times 115}$

$= 2{,}1 \times 10^{-2}$ K · W^{-1}.

$\Phi_{toit} = \dfrac{T_c - T_f}{R_{th}}$

Donc $\Phi_{toit} = \dfrac{T_i - T_e}{R_{th}} = \dfrac{19 - 4{,}0}{2{,}1 \times 10^{-2}} = 7{,}0 \times 10^2$ W

› Le problème à résoudre

$\Phi_{total} = \Phi_{toit} + \Phi_{murs} + \Phi_{sol} + \Phi_{portes + vitres}$

$\Phi_{total} = 7{,}0 \times 10^2 + 743 + 66{,}8 + 123 = 1{,}6 \times 10^3$ W

Afin de conserver une température constante dans l'habitation, la puissance moyenne du système de chauffage doit être égale au flux thermique moyen sortant de la maison.

Il faut donc avoir un système de chauffage de puissance $P = 1{,}6 \times 10^3$ W.

On cherche la consommation énergétique en kWh · m^{-2} · an^{-1}.

La surface est de $S = 100$ m^2. Le chauffage fonctionne 120 jours (donc 120×24 h) par an.

Cette consommation représente 60 % de la consommation d'énergie annuelle.

Donc $0{,}60 \times E = \dfrac{P \cdot \Delta t}{S}$.

Donc $E = \dfrac{P \cdot \Delta t}{0{,}60S} = \dfrac{1{,}6 \times 10^3 \times 120 \times 24}{0{,}60 \times 100}$

$= 77$ kWh · m^{-2} · an^{-1}

La classe énergétique de la maison est donc B.

46 › Questions préliminaires

1. a. Le transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide donc, dans ce cas, du randonneur (33 °C) vers l'air et le sol (15 °C).

b. Il s'agit d'un transfert thermique par conduction. Il y a un contact entre le système (le randonneur) et l'extérieur (le sol et l'air). Au niveau microscopique, l'agitation thermique se transmet de proche en proche sans transport de matière.

2. Surface du matelas : $S_{matelas} = 1{,}93 \times 0{,}62 = 1{,}2$ m^2

On peut estimer que le randonneur couché occupe la moitié du matelas, on retiendra donc 0,5 m^2 comme surface du randonneur en contact avec le matelas.

› Le problème à résoudre

Flux thermique Φ traversant le matelas « isotapis » :

$\Phi = \dfrac{T_c - T_f}{R_{th}} = \dfrac{T_c - T_f}{\dfrac{e}{\lambda \cdot S}} = \dfrac{(T_c - T_f) \cdot \lambda \cdot S}{e}$

AN : $\Phi = \dfrac{(33 - 15) \times 0{,}03 \times 0{,}5}{1{,}1 \times 10^{-2}} = 20$ W

Le flux thermique traversant le matelas « thermoplus », dans les mêmes conditions d'utilisation, est de 40 W.

Donc $\Phi_{thermoplus} > \Phi_{isotapis}$.

Le matelas qui est le meilleur isolant est donc le matelas « isotapis ».

47 1. a. Le premier principe de la thermodynamique indique que si un système fermé au repos a son énergie qui varie, c'est qu'il échange avec l'extérieur de l'énergie soit sous forme de travail (W) soit sous forme de transfert thermique (Q) :

$\Delta U = Q + W$

Donc $\dfrac{\Delta U}{\Delta t} = \dfrac{Q}{\Delta t} + \dfrac{W}{\Delta t}$.

L'équation différentielle traduit ce premier principe de la thermodynamique :

• le terme $\rho \cdot V \cdot c \cdot \dfrac{dT}{dt}$ est lié au taux de variation de l'énergie interne du système (en W) ;

• le terme $-\alpha \cdot (T - T_p)$ traduit le flux thermique (en W) ;

• le terme P représente la puissance électrique (en W).

b. Quand la température est stabilisée :

$\dfrac{dT}{dt} = 0$ donc $-\alpha \cdot (T - T_p) + P = 0$ donc $T - T_p = \dfrac{P}{\alpha}$.

D'après le graphe de gauche : $T - T_p = 40$ K.

c. $T - T_p = \dfrac{P}{\alpha} = \dfrac{96}{\alpha} = 40$ donc $\alpha = \dfrac{96}{40} = 2{,}40$ W · K^{-1}.

2. a. Le bilan énergétique est modifié, il n'y a plus d'échange d'énergie avec l'extérieur sous forme de travail (W).

On a donc uniquement $\rho \cdot V \cdot c \cdot \dfrac{dT}{dt} = -\alpha \cdot (T - T_p)$.

Le terme $\rho \cdot V \cdot c \cdot \dfrac{dT}{dt}$ est lié au taux de variation de l'énergie interne du système (en W).

Le terme $-\alpha \cdot (T - T_p)$ traduit le flux thermique (en W).

Donc $\dfrac{dT}{dt} = -\gamma \cdot (T - T_p)$ avec $\gamma = \dfrac{\alpha}{\rho \cdot V \cdot c}$.

On retrouve la forme de la loi thermique de Newton.

b. La solution générale de l'équation différentielle est :

$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_p$, donc $B = T_p$.

À $t = 0$ s, $T = T_{max}$, donc $T_{max} = A + T_p$ donc :

$A = T_{max} - T_p$.

Donc $T(t) = (T_{max} - T_p) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_p$.

c. $T(t) = (T_{max} - T_p) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_p$

Donc $(T_{max} - T_p) \cdot e^{-\gamma \cdot t} = T - T_p$.

Donc $e^{-\gamma \cdot t} = \dfrac{T - T_p}{T_{max} - T_p}$.

Donc $-\gamma \cdot t = \ln(T - T_p) - \ln(T_{max} - T_p)$

Donc $\ln(T - T_p) = -\gamma \cdot t + \ln(T_{max} - T_p)$.

On a bien $\ln(T_{max} - T_p) = \ln 40 = 3{,}68$

Et on a donc $\gamma = 1{,}33 \times 10^{-2}$ W · K^{-1}.

Donc :

$\alpha = \gamma \cdot \rho \cdot V \cdot c$

$= 1{,}33 \times 10^{-2} \times 1\,000 \times 0{,}1 \times 10^{-3} \times 1\,800$

$= 2{,}39$ W · K^{-1}

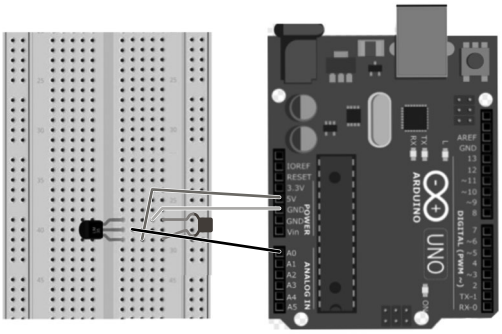
On retrouve la valeur précédente.

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 420

1. Proposition de protocole expérimental

1.



2. Programme complété :

```
float volt; // Définition de la tension
float temp; // Définition de la température
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
   valeur = analogRead(Ao); //Mesure du capteur sur le port choisi (ici Ao)
tension = 5*valeur/1023; //Calcul de la tension
temp = tension/100; //Calcul de la température : une tension de 10mV correspond à 1 °C donc 1 V correspond à 100 °C.
Serial.println(temp); //Affichage de la température
delay(1000); //Durée entre deux mesures
}
```

3. $\theta = 20$ °C. D'après le graphe qui présente les intervalles d'incertitude du capteur LM35, à 20 °C, l'intervalle est de ±1,1 °C. L'incertitude-type est donné par la moitié de la longueur de cet intervalle, donc l'incertitude est de 1,1 °C.

4. On peut utiliser le capteur de température LM35 relié à l'Arduino. Le programme de ce dernier permet d'afficher la température toutes les secondes (1 000 ms). On bascule les mesures dans un tableur grapheur qui permet d'afficher le graphe de l'évolution de la température en fonction du temps.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental proposé

1 et **2.** On obtient une courbe exponentielle décroissante que l'on peut modéliser par une courbe de type : $T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$

Le logiciel nous donne ici $A = 40$; $B = 20$ et $\gamma = 0{,}03$.

3. Exploitation du résultat obtenu

1. L'air initialement chauffé perd de l'énergie interne par transfert thermique avec l'extérieur.

2. La solution générale de l'équation différentielle est :

$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$, donc $B = T_{amb}$.

À $t = 0$ s, $T = T_0$, donc $T_0 = A + T_{amb}$, donc $A = T_0 - T_{amb}$

Donc : $T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$

D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :

$T(t) = (60 - 20) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$

Donc : $T(t) = 40 \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 20$

On a $T(16) = 40 \cdot e^{-\gamma \times 16} + 20 = 45$

$e^{-\gamma \times 16} = \dfrac{25}{40} = \dfrac{5}{8}$

$16\gamma = \ln \dfrac{8}{5}$

$\gamma = \dfrac{\ln \frac{8}{5}}{16} = 0{,}029$

Donc $T(t) = 40e^{-0{,}029 \cdot t} + 20$

3. L'expression obtenue est en accord avec la modélisation expérimentale.

4. Une source d'incertitude possible dans les mesures réalisées peut provenir de la fiabilité du capteur et de l'Arduino utilisés.

CHAPITRE 17

Manuel p. 428

Les phénomènes ondulatoires

LE PROGRAMME

1. Caractériser les phénomènes ondulatoires

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Intensité sonore, intensité sonore de référence, niveau d'intensité sonore. Atténuation (en dB).	Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal. *Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.* **Capacité mathématique :** Utiliser la fonction logarithme décimal et sa réciproque
Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques. Angle caractéristique de diffraction.	Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. *Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées.* *Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.*
Interférences de deux ondes, conditions d'observation. Interférences constructives, interférences destructives.	Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène. *Tester les conditions d'interférences constructives ou destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase.*
Interférences de deux ondes lumineuses, différence de chemin optique, conditions d'interférences constructives ou destructives.	Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. Établir l'expression de l'interfrange. *Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.* **Capacité numérique :** Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase à l'origine de l'un des deux.
Effet Doppler. Décalage Doppler.	Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension. Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. *Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.*

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 428

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis les notions, vues en enseignement scientifique de 1re, d'intensité sonore et de niveau d'intensité sonore.
Dans la situation proposée, il s'agit de calculs de niveau d'intensité sonore connaissant l'intensité sonore. Une comparaison avec un niveau d'intensité sonore de danger valant 85 dB est demandée.

› Exemple de réponse attendue

L'expression du niveau d'intensité sonore est : $L = 10 \log\frac{I}{I_0}$.

AN : $L = 10 \times \log\frac{2{,}3 \times 10^{-3}}{1{,}0 \times 10^{-12}} = 93{,}6$ dB.

Le niveau d'intensité sonore vaut donc 93,6 dB, ce qui dépasse largement le niveau d'intensité de danger : cela ne paraît pas raisonnable.

› En classe de Terminale

Les élèves découvriront davantage la fonction logarithme log x et sa fonction réciproque 10^x, entre autres à l'**activité 1**.

SITUATION 2

Dans cette deuxième situation, les élèves sont invités à réinvestir la notion de périodicité spatiale, avec la longueur d'onde, abordée l'année précédente en enseignement de physique-chimie de spécialité.
Le document mis à disposition permet d'avoir la valeur de la longueur d'onde en utilisant une échelle et en comptant plusieurs longueurs d'onde. Il est bon de rappeler que cette image est obtenue à l'aide d'une cuve à ondes, sur laquelle une raie claire est le sommet d'une vague et une raie sombre le creux de la vague.

› Exemple de réponse attendue

Il faut utiliser l'échelle pour déterminer la longueur d'onde. Entre le point A et le point B, on compte 4 longueurs d'onde :

$$4\lambda = 5 \text{ cm, soit } \lambda = \frac{5}{4} = 1{,}25 \text{ cm.}$$

La longueur d'onde vaut donc 1,25 cm.
On peut alors exprimer la célérité de l'onde :
$c = \lambda \cdot f$, la longueur d'onde devant être convertie en mètre : $\lambda = 1{,}25 \times 10^{-2}$ m.

AN : $c = 1{,}25 \times 10^{-2} \times 20 = 0{,}25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
La célérité de l'onde à la surface de l'eau vaut donc $0{,}25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

› En classe de Terminale

Les élèves devront maîtriser les notions de longueur d'onde et de fréquence ainsi que la relation entre ces deux grandeurs, notamment pour l'étude de l'effet Doppler (**activité 5**).

ACTIVITÉS

p. 430 ACTIVITÉ 1

Atténuation en dB

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité permet d'illustrer l'atténuation géométrique, c'est-à-dire liée à la distance à la source, mais aussi l'atténuation par absorption, due à la nature du matériau. La pollution sonore est une problématique importante dans les grandes villes ou près des axes routiers et surveillée attentivement, par exemple par Bruitparif pour Paris.
Avec le confinement vécu pendant la crise du Covid-19, Paris intramuros a par exemple enregistré une baisse de 9 dB(A) du niveau de bruit moyen pondéré au cours de la journée (indicateur Lden) le 22 mars 2020 par rapport au début du confinement total, le 17 mars.

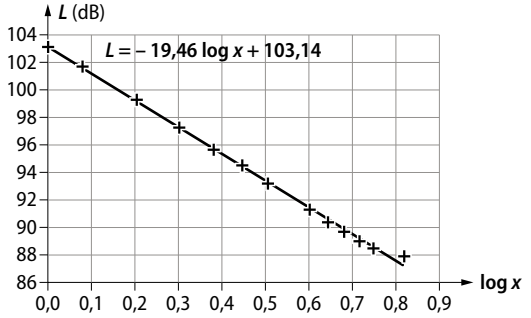
› Résolution

• *Type de source (doc. 1) :*
Au laboratoire, on dispose d'un haut-parleur, d'un sonomètre (ou bien d'un smartphone en mode « sonomètre ») et d'un mètre ruban. On pourra essayer de tester si l'on dispose d'une source directive (c'est-à-dire si le niveau sonore dépend de la direction : un axe est-il privilégié ou non ?) ou omnidirective. Une route fréquentée est assimilée à une source sonore directive.

• *Atténuation géométrique (doc. 2) :*
Il faut procéder à plusieurs mesures du niveau sonore L en fonction de la distance x à la source sonore. On conseille de tracer $L = f(\log x)$.
Exemple de mesures et graphique obtenu :

x (en m)	log x	L (en dB)
1	0,000	103,1
1,2	0,079	101,7
1,6	0,204	99,3
2	0,301	97,3
2,4	0,380	95,7
2,8	0,447	94,5
3,2	0,505	93,2

x (en m)	$\log x$	L (en dB)
4	0,602	91,3
4,4	0,643	90,4
4,8	0,681	89,7
5,2	0,716	89
5,6	0,748	88,5
6,6	0,820	87,9



On pourra notamment vérifier la relation théorique : si la distance x double, le niveau d'intensité sonore diminue de 6 dB.

• *Atténuation par absorption (doc. 3 et 4) :*

– Cette atténuation dépend de la fréquence : à une distance fixée, et pour une intensité sonore fixe, on vérifie si la fréquence est un paramètre influençant le niveau d'intensité sonore (l'atténuation augmente si la fréquence augmente : c'est pourquoi les sons graves se propagent mieux que les sons aigus, ce qui explique par exemple que les éléphants communiquent sur de grandes distances par infrasons)

– On peut s'attendre à ce qu'un élève propose le protocole de faire varier l'humidité relative pour tester son influence sur le niveau sonore (l'atténuation diminue si l'humidité augmente). Ce sera plus difficile à mettre en œuvre en TP, mais il existe des humidificateurs dans le commerce.

– Enfin, l'élève doit proposer d'interposer plusieurs matériaux entre la source et le sonomètre en utilisant la chambre sourde :

• un matériaux creux, comme le carton (voire le parpaing en BTP) ;

• un matériau poreux, comme la mousse, du polystyrène… ;

• un matériau plein, comme le bois (voire le béton en BTP, des carreaux de siporex…).

› Conclusion

Les moyens que le citadin peut mettre en œuvre sont :

– s'éloigner de la source sonore bruyante, par exemple en déménageant (atténuation géométrique) ;

– mieux isoler son habitat en plaçant des matériaux isolants acoustiques comme la mousse polyuréthane (atténuation par absorption).

p. 431 **ACTIVITÉ 2**

Diffraction

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité a pour objectif de travailler expérimentalement avec les élèves sur la diffraction, avec l'utilisation d'un logiciel de traitement d'images. Il s'agit aussi pour eux d'exploiter les incertitudes composées.

Lors de cette activité expérimentale, les élèves ont à manipuler un logiciel de traitement d'images, choix laissé à la liberté pédagogique de l'enseignant (on pourra utiliser le logiciel Regavi).

› Mesures et analyse

1. On réalise les deux protocoles expérimentaux proposés pour déterminer la taille de l'ouverture de la fente.

• *Protocole 1 :*

On va mesurer la largeur de la tache centrale de diffraction en mesurant 2 L, c'est-à-dire en mesurant l'écart entre les minima des deuxièmes extinctions. On exploite les deux relations du doc. 1, pour exprimer la taille de l'ouverture : $a = \dfrac{2\lambda \cdot D}{L}$.

Exemple de mesures : $L = 2{,}5$ cm ; $D = 2{,}00$ m ; $\lambda = 650$ nm.

AN : $a = \dfrac{2 \times 650 \times 10^{-9} \times 2{,}00}{2{,}5 \times 10^{-2}} = 1{,}04 \times 10^{-4}$ m

$= 104$ µm.

• *Protocole 2 :*

On va mesurer la largeur de la tache centrale de diffraction à l'aide du logiciel de traitement d'images. Il faut au préalable capturer l'image, puis la traiter dans le logiciel. Il faut bien entendu inclure une échelle de distance, sans quoi aucune mesure ne sera possible.

On utilisera la même relation pour la taille de l'ouverture : $a = \dfrac{2\lambda \cdot D}{L}$.

Exemple de mesures : $L = 2{,}2$ cm ; $D = 1{,}70$ m ; $\lambda = 650$ nm.

AN : $a = \dfrac{2 \times 650 \times 10^{-9} \times 1{,}70}{2{,}2 \times 10^{-2}} = 1{,}00 \times 10^{-4}$ m

$= 100$ µm.

2. On évalue les incertitudes-types sur les mesures. Par exemple, sur la mesure de 2 L : $u(L) = 0{,}1$ cm.

$u(\lambda)$ est à lire sur la notice du constructeur du laser (Jeulin indique 10 nm d'incertitude sur sa diode laser de 650 nm).

$u(D) = 0{,}1$ cm.

Dans le cas de la détermination de $u(L)$ avec le logiciel, on apprécie le décalage lors du déplacement de la souris/pointeur.

Avec les mesures du protocole 1 :

$$u(a) = 1{,}00 \times 10^{-4} \times \sqrt{\left(\frac{10}{650}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{2{,}5}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1 \times 10^{-2}}{2{,}00}\right)^2}$$
$$= 4{,}5 \times 10^{-6}\,\text{m} \approx 5\ \mu\text{m}$$

Avec les mesures du protocole 2, on obtient :

$$u(a) = 1{,}04 \times 10^{-4} \times \sqrt{\left(\frac{10}{650}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{2{,}2}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1 \times 10^{-2}}{1{,}70}\right)^2}$$
$$= 5 \times 10^{-6}\,\text{m} \approx 5\ \mu\text{m}$$

› Conclusion

On prend comme valeur de référence fournie par le fabricant : $a = 100$ µm.

Il faut comparer avec la valeur fournie par le fabricant de la fente :

$$Q = \frac{a_{\text{mes}} - a_{\text{réf}}}{u(a)}$$

Avec le protocole 1 : $Q = 0$.

Pour le protocole 2 : $Q = \dfrac{104 - 100}{5} = 0{,}8$.

On pourra dire que la valeur mesurée et la valeur de référence sont compatibles à Q fois $u(a)$ près, soit ici 0,8 fois 5 µm près pour le protocole 2. Le résultat est proche de la valeur fournie par le fabricant, ce qui conduit à des résultats expérimentaux entachés d'incertitudes de mesures peu importantes.

Selon les mesures et incertitudes obtenues ici avec les deux protocoles, celui qui permet de déterminer le plus précisément la taille de l'ouverture est le protocole 1.

p. 432 ACTIVITÉ 3

Interférences de deux ondes à la surface de l'eau

Commentaires pédagogiques

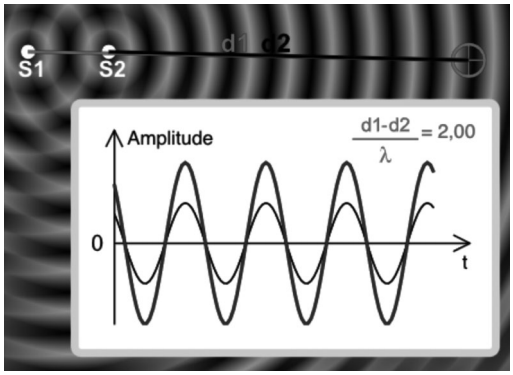
Cette activité permet de découvrir que deux ondes de même fréquence et synchrones interfèrent.

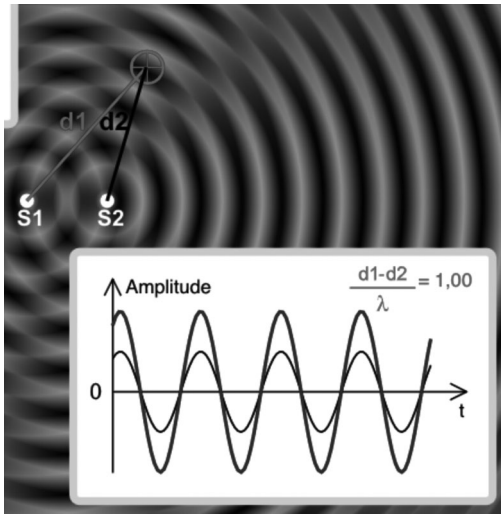
Grâce à cette activité utilisant les ondes à la surface de l'eau, il est possible de bien matérialiser les ondes et leurs superpositions géométriques.

Un programme Python où l'on peut modifier la valeur du déphasage permet de visualiser la superposition de deux ondes.

› Résolution

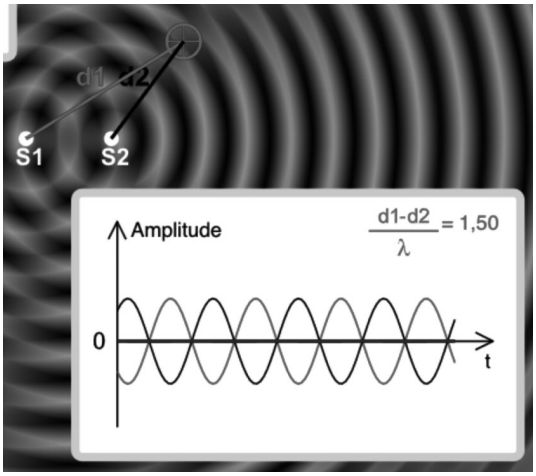
• L'animation (doc. 5) permet de se placer aux conditions d'interférences constructives :

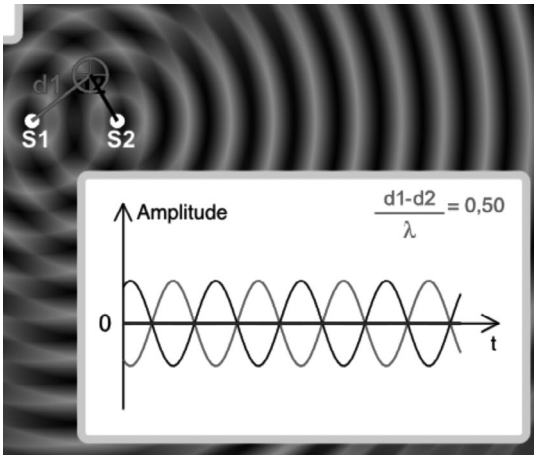




On vérifie ainsi que l'onde résultante est maximale lorsque la différence de chemin $d_1 - d_2$ est un multiple de la longueur d'onde.

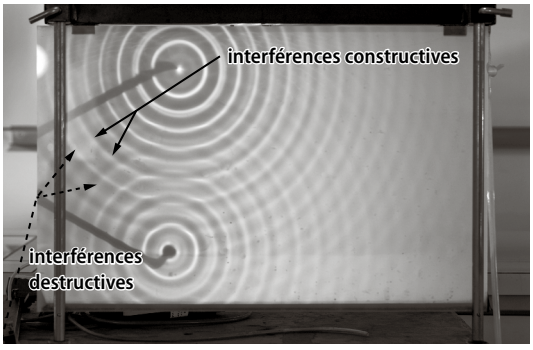
L'animation permet également de se placer dans les conditions d'interférences destructives :





On vérifie ainsi que l'onde résultante est minimale lorsque la différence de chemin $d_1 - d_2$ est un multiple de la demi-longueur d'onde.

• On peut aussi exploiter la cuve à ondes (doc. 4). Il faut connaître la distance entre les deux sources pour connaître l'échelle de distance. On peut alors déterminer la longueur d'onde, puis déterminer les lieux d'interférences constructives et destructives.



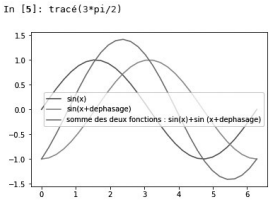
• Dans le programme Python, il faut modifier le déphasage pour apprécier les différents cas de superposition géométrique des deux ondes.

```
from math import *
from pylab import *
print("bienvenue, nous allons tracer une fonction sin X, sin (X + déphasage) et la somme des deux fonctions")
print("veuillez saisir le déphasage en écrivant tracé(valeur du déphasage), par exemple tracé(3*pi/2)")
def tracé(dephasage):
    x = linspace(0, 2*pi, 30)
    y1 = sin(x)
    y2 = sin(x+dephasage)
    y3 = y1 + y2
    plot(x, y1, label="sin(x)")
    plot(x, y2, label="sin(x+dephasage)")
    plot(x, y3, label="somme des deux fonctions : sin(x)+sin (x+dephasage)")
    legend()

    show()
```

Le sinus étant calculé en radian, il faut entrer des valeurs multiples de π ou d'une fraction de π. Il faut au moins tester :
– 0 ; 2*pi ; 4*pi ; etc. Ce sont ces valeurs qui permettent d'observer les interférences constructives ;
– pi/2 ; 3*pi/2 ; 5*pi/2... ; pi ; 3*pi, etc. Ce sont ces valeurs qui permettent d'observer les interférences destructives.

On obtient par exemple :



› Conclusion

On peut donc observer les interférences constructives lorsque le point M est situé au point de rencontre des maxima d'amplitude, ou bien lorsque les ondes ont un déphasage multiple de 2π, ce qui correspond à un multiple de la longueur d'onde λ.
On peut donc observer les interférences destructives lorsque le point M est situé au point de rencontre d'un maximum d'amplitude pour l'une des deux ondes, et au minimum d'amplitude de l'autre, ou bien lorsqu'elles ont un déphasage multiple impair de π soit $(2k + 1)\,\pi$, ce qui correspond aussi à un multiple de la demi-longueur d'onde $(2k + 1)\,\frac{\lambda}{2}$.

p. 433 **ACTIVITÉ 4**

Résolution de l'écran d'un smartphone par interférences

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité a pour objectif d'utiliser le phénomène d'interférences pour déterminer la résolution d'un écran d'un smartphone. La résolution d'un écran, étudiée en SNT en classe de seconde, correspond aux nombres de pixels par pouce (donnée que l'on trouve chez les constructeurs en ppp ou dpi).
L'interfrange est de l'ordre de grandeur du centimètre. Afin d'accéder à une mesure précise de cet interfrange, il conviendra de mesurer une distance correspondant à plusieurs interfranges. Cette stratégie permet de sensibiliser les élèves aux mesures et à leurs incertitudes. Les résultats de mesures ci-dessous ont été établis pour deux smartphones de résolutions d'écran différentes : un iPhone 8 et un Samsung A5.

› Mesures et analyses

1. a. • *Pour l'iPhone 8 :*
Distance smartphone-écran : $D = 1{,}62\ \text{m} \pm 0{,}01\ \text{m}$.
Interfrange entre deux points rouges (pour $\lambda = 650$ nm) :
$i = 1{,}3 \pm 0{,}1\ \text{cm}$

• *Pour le Samsung A5 :*
Distance smartphone-écran : $D = 1{,}62\ \text{m} \pm 0{,}01\ \text{m}$.

Interfrange entre deux points rouges (pour $\lambda = 650$ nm) :
$i = 1{,}9 \pm 0{,}1$ cm

b. Pour estimer l'incertitude-type de type A, il faut procéder à une évaluation statistique. On renouvelle un grand nombre de fois la mesures, puis on détermine la moyenne de la série de mesure pour avoir la meilleure estimation de la taille du pixel et, en déterminant l'écart-type, on détermine son incertitude-type (voir fiche méthode p. 538 du manuel).

2. L'expression de l'interfrange est $i = \dfrac{\lambda \cdot D}{e}$, ce qui permet d'isoler l'écart e entre deux pixels :

$$e = \frac{\lambda \cdot D}{i}$$

AN :

• *Pour l'iPhone 8 :*

$$e = \frac{650 \times 10^{-9} \times 1{,}62}{1{,}3 \times 10^{-2}} = 8{,}1 \times 10^{-5}\ \text{m} = 81\ \mu\text{m}$$

• *Pour le Samsung A5 :*

$$e = \frac{650 \times 10^{-9} \times 1{,}62}{1{,}9 \times 10^{-2}} = 5{,}5 \times 10^{-5}\ \text{m} = 55\ \mu\text{m}$$

› Conclusion

• *Pour l'iPhone 8 :*

Pour déterminer la résolution de l'écran, il faut calculer le nombre de pixels par pouce, sachant qu'un pouce mesure 2,54 cm. Par proportionnalité :

1 pixel	$8{,}1 \times 10^{5}$ m
***N* pixels**	$2{,}54 \times 10^{-2}$ m

$$N = \frac{1 \times 2{,}54 \times 10^{-2}}{8{,}1 \times 10^{-5}} = 314 \text{ pixels par pouce.}$$

La notice du constructeur indique un écran de 10,5 cm × 5,9 cm pour 1 334 pixels × 750 pixels. En divisant la taille de l'écran par le nombre de pixels, on trouve la valeur théorique de la taille du pixel : 79 µm, ce qui correspond à 326 dpi.

• *Pour le Samsung A5 :*

Pour déterminer la résolution de l'écran, il faut calculer le nombre de pixels par pouce, sachant qu'un pouce mesure 2,54 cm. Par proportionnalité :

1 pixel	$5{,}5 \times 10^{-5}$ m
***N* pixels**	$2{,}54 \times 10^{-2}$ m

$$N = \frac{1 \times 2{,}54 \times 10^{-2}}{5{,}5 \times 10^{-5}} = 462 \text{ pixels par pouce}$$

La notice du constructeur indique 424 dpi.

Effet Doppler

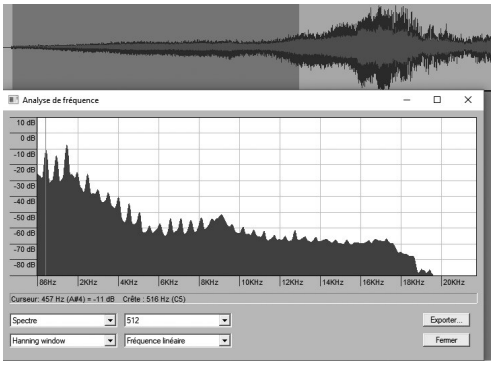
Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité a pour objectif de mesurer la vitesse d'un véhicule par effet Doppler en acoustique. La tâche pour les élèves est d'utiliser le logiciel Audacity et d'obtenir la transformée de Fourier de ce signal, ou bien d'exploiter une application pour smartphone utilisant l'effet Doppler (par exemple, Phyphox).

L'application Phyphox et le logiciel Audacity fonctionnent avec un enregistrement d'un son de klaxon en mouvement, disponible sur le site ressources et le manuel numérique, ce qui rend très facile leur utilisation en classe. Le véhicule de l'enregistrement roule sur régulateur de vitesse à 90 km · h^{-1}, sur une route départementale limitée à 80 km · h^{-1}.

› Mesures et analyses

• *Avec Audacity :*



Le traitement du son du klaxon avec Audacity à l'arrêt donne $f_e = 487$ Hz.

Le traitement du son du klaxon en déplacement donne une fréquence du fondamental :

$f_{\text{crête}} = 516$ Hz.

On exploite la relation donnée dans le doc. 1 pour exprimer la vitesse du véhicule :

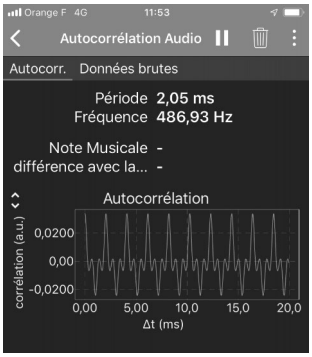
$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{f_e}$$

AN :

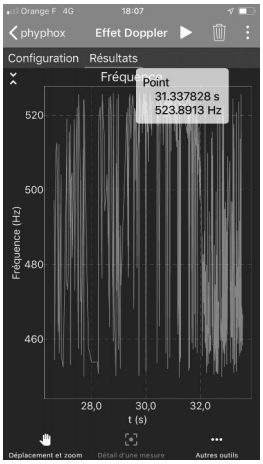
$$v = \frac{(516 - 487) \times 340}{487} = 20{,}2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 73\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$$

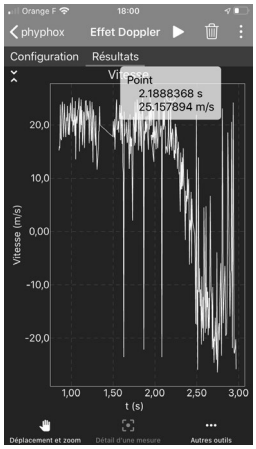
• *Avec Phyphox :*

On obtient la fréquence fondamentale du son en lançant « Autocorrélation Audio ». On obtient 487 Hz.



Sur un ordinateur, et en approchant le micro du smartphone près des haut-parleurs de l'ordinateur, on lance « Effet Doppler » sur l'application.





L'application donne simultanément la vitesse en $m \cdot s^{-1}$ et la fréquence. On peut « forcer » les élèves à ne noter que la fréquence. Les valeurs étant très bruitées, on peut dézoomer l'axe des ordonnées afin d'avoir moins de variation visible, ou bien on peut exporter les valeurs en format Excel ou CSV et en faire une moyenne en éliminant des valeurs « aberrantes », par exemple les valeurs égales ou inférieures au fondamental.
Pour $f = 523$ Hz, $v = 25{,}16\ m \cdot s^{-1} = 91\ km \cdot h^{-1}$
On constate que le deux méthodes donnent des résultats distincts : avec Phyphox, le conducteur ne semble pas respecter le Code de la route.

› Conclusion

L'application « Effet Doppler » de Phyphox donne des résultats bien plus facilement qu'Audacity, qui nécessite au moins de savoir traiter le spectre de fréquence.
La valeur trouvée avec l'application est plus proche de la vitesse réelle du véhicule ($90\ km \cdot h^{-1}$) et permet de conclure que l'automobiliste ne respecte pas la limitation de vitesse sur route départementale. L'application Phyphox paraît plus précise et adaptée pour la mesure de la vitesse.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel

p. 440

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car ce n'est pas le bon résultat du calcul.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car ce n'est pas le bon résultat du calcul.
La proposition C est une bonne réponse. En effet :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{5{,}9 \times 10^{-7}}{1{,}0 \times 10^{-12}} = 58\ dB$$

2 La proposition A est une bonne réponse car, en calculant l'intensité sonore à partir de la relation $I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$, on a

$$I = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{104}{10}} = 2{,}5 \times 10^{-2}\ W \cdot m^{-2}$$

La proposition B n'est pas une bonne réponse car ce n'est pas le bon résultat du calcul.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car $I = 10^{-12} \times 10^{\frac{104}{10}}$.

3 La proposition A est une bonne réponse car il y a modification de l'aspect de l'onde après traversée de l'ouverture.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car il n'y a pas de modification de l'aspect de l'onde.
La proposition C est une bonne réponse car il y a modification de l'aspect de l'onde après traversée de l'ouverture.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car ce n'est pas le bon résultat du calcul.
La proposition B est une bonne réponse. On utilise la relation $\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{d}{2D}$, ce qui permet d'isoler $a = \frac{2\lambda \cdot D}{d}$.

AN : $a = \frac{2 \times 650 \times 10^{-9} \times 2{,}70}{2{,}40 \times 10^{-2}} = 1{,}46 \times 10^{-4}$ m
$= 146\ \mu m$.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car ce n'est pas le bon résultat du calcul.

5 La proposition A est une bonne réponse car les deux ondes sont en opposition de phase.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car cela se produit quand les deux ondes sont en phase.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car cela se produit quand les deux ondes ont un décalage quelconque.

6 La proposition A est une bonne réponse, car en prenant comme début la frange qui passe exactement sur la graduation 4 mm et comme fin celle qui passe exactement sur la graduation 13 mm, on peut dénombrer 4 longueurs d'onde λ pour 9 mm soit :

$\lambda = \frac{9}{4} = 2{,}25$ mm.

La proposition B n'est pas une bonne réponse car la longueur d'onde est un peu plus grande que 2,0 mm.

La proposition C n'est pas une bonne réponse car 2,75 mm est bien trop élevée.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car cela correspond seulement au décalage Doppler, et non à la fréquence perçue.

La proposition B n'est pas une bonne réponse car cela correspond à la fréquence perçue quand l'onde se rapproche

La proposition C est une bonne réponse. Il faut d'abord calculer le décalage Doppler :

$\Delta f = \frac{f_e \cdot v}{c} = \frac{40\,000 \times 20{,}0}{340} = 2{,}35$ kHz.

Comme la source s'éloigne, il faut soustraire le décalage Doppler à la fréquence de l'émetteur pour connaître la fréquence perçue f_R (le son perçu est plus grave) :

$f_R = f_e - \Delta f$

AN : $f_R = 40{,}0 - 2{,}35 = 37{,}6$ kHz (on ne conserve que 3 chiffres significatifs).

Acquérir les bases

p. 441

› 1. Niveau d'intensité sonore

8 **1. a.** On doit effectuer la mesure du niveau d'intensité sonore avec un sonomètre.

b. Calculons l'intensité sonore associée à N guitares de niveau sonore de 75 dB :

$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$

AN : $I = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{75}{10}} = 3{,}2 \times 10^{-5}$ W · m^{-2}

À un niveau sonore d'une seule guitare à 65 dB correspond l'intensité sonore :

$I' = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{65}{10}} = 3{,}2 \times 10^{-6}$ W · m^{-2}.

On effectue le quotient des intensités pour connaître le nombre de guitares jouant ensemble :

$N = \frac{I}{I'} = \frac{3{,}2 \times 10^{-5}}{3{,}2 \times 10^{-6}} = 10$

Il y a donc 10 guitares qui jouent ensemble.

2. Il faut d'abord calculer l'intensité sonore d'un triangle de 50 dB :

$I'' = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{50}{10}} = 1{,}0 \times 10^{-7}$ W · m^{-2}

Si l'on ajoute cette intensité à l'intensité des 10 guitares $I = 3{,}2 \times 10^{-5}$ W · m^{-2} :

$I + I'' = 3{,}2 \times 10^{-5} + 1{,}0 \times 10^{-7} = 3{,}21 \times 10^{-5}$ W · m^{-2}

Le niveau d'intensité sonore associé vaut alors :

$L' = 10 \log\left(\frac{I + I''}{I_0}\right)$

AN : $L' = 10 \log\left(\frac{3{,}21 \times 10^{-5}}{1{,}0 \times 10^{-12}}\right) \approx 75$ dB

L'intensité sonore du triangle ne modifie pas grandement le niveau d'intensité sonore total. On dit qu'elle est négligeable.

9 **1.** L'appareil 1 a un niveau d'intensité sonore de 44 dB et l'appareil 2 de 38 dB. Il y a donc 6 dB d'écart.

L'intensité sonore de l'appareil 1 est : $I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$.

AN : $I_1 = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{44}{10}} = 2{,}51 \times 10^{-8}$ W · m^{-2}

L'intensité sonore de l'appareil 2 est : $I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$.

AN : $I_2 = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{38}{10}} = 6{,}31 \times 10^{-9}$ W · m^{-2}.

$\frac{I_1}{I_2} = 4$: l'intensité sonore de l'appareil 1 est le quadruple de celle de l'appareil 2. Quand il fonctionne, l'appareil 1 fait autant de bruit que 4 appareils 2 qui tourneraient ensemble.

2. La différence de niveau sonore est donc importante : bien qu'il n'y ait que 6 dB d'écart (ce qui peut paraître peu), cela correspond à une intensité quatre fois plus forte. C'est donc une information dont il faut tenir compte au moment de l'achat.

10 **1.** Calculons l'intensité sonore associée au niveau sonore de 83 dB :

$I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$

AN : $I_1 = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{83}{10}} = 2{,}0 \times 10^{-4}$ W · m^{-2}.

Pour le niveau sonore d'une guitare à 82 dB, l'intensité sonore vaut :

$I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$

AN : $I_2 = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{82}{10}} = 1{,}6 \times 10^{-4}$ W · m^{-2}.

2. a. Les intensités sonores s'ajoutent :

$I_{tot} = 2{,}0 \times 10^{-4} + 2 \times 1{,}6 \times 10^{-4} = 5{,}2 \times 10^{-4}$ W · m^{-2}

Le niveau d'intensité sonore vaut donc :

$L = 10 \log \frac{I_{tot}}{I_0}$

AN : $L = 10 \log\dfrac{5{,}2\times10^{-4}}{1{,}0\times10^{-12}} = 87{,}2$ dB

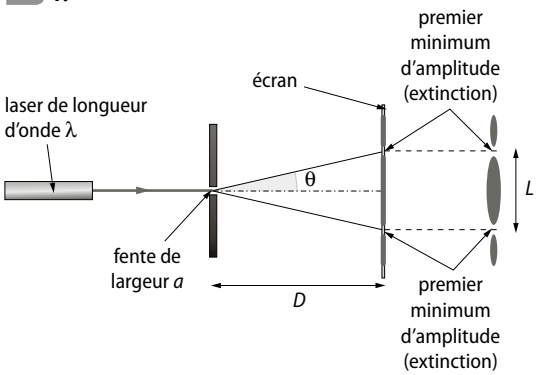
b. Le niveau d'intensité sonore dépasse la valeur limite fixée par le Code du travail. L'entreprise est en infraction.

11 **1.** 120 dB et 160 dB se situent au-dessus du seuil de douleur, 60 dB est situé dans la zone d'inconfort, proche du bruit d'une cantine.

2. On peut leur donner comme conseils :
• de s'éloigner de la source sonore : quand on double la distance, le niveau sonore diminue de 6 dB ;
• de protéger leur animal avec un casque ou bien de l'enfermer dans une voiture ou un appartement, ce qui atténuera, par absorption, le niveau d'intensité sonore ;
• de ne pas amener leur animal pour ne pas l'exposer à des niveaux d'intensité sonore qui pourraient le faire souffrir ;
• de n'aller voir que des feux d'artifices à bruits contenus.

› 2. Diffraction d'une onde

12 **1.**



2. a. L'expression de l'angle caractéristique de diffraction est :

$\theta = \dfrac{\lambda}{a}$, avec θ l'angle caractéristique de diffraction (en rad), λ la longueur d'onde (en m) et a la taille de l'ouverture (en m).

b. Dans l'approximation des petits angles, $\tan\theta \approx \theta$.

$\tan\theta = \dfrac{\text{coté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \dfrac{L/2}{D}$, en égalisant avec la relation obtenue à la question **1.**, on obtient :

$\theta = \dfrac{L}{2D} = \dfrac{\lambda}{a}$.

13 **1.** Si la lumière se propageait rectilignement, alors on verrait une tache lumineuse du même diamètre que le trou, ce qui n'est pas le cas sur la photo.

2. a. Dans l'approximation des petits angles, $\tan\theta \approx \theta$.

Comme $\tan\theta = \dfrac{L}{2D}$, on obtient :

$$\theta = \frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a}.$$

b. On peut donc en déduire l'expression de la longueur d'onde du laser vert en isolant λ dans l'égalité précédente : $\lambda = \dfrac{L \cdot a}{2D}$, avec ici une mesure de $L = 9$ mm (bien partir du milieu de la première extinction noire).

AN : $\lambda = \dfrac{9\times10^{-3}\times200\times10^{-6}}{2\times1{,}7} = 5{,}29\times10^{-7}$ m
$= 529$ nm.

La longueur d'onde du laser vaut 529 nm.

14 *Les mesures ci-dessous ont été réalisées sur le manuel imprimé de l'élève. Elles diffèrent de celles du spécimen du professeur.*

1. Par proportionnalité, on détermine la taille réelle de la longueur d'onde avant obstacle :

3,6 cm	100 mm
$3\lambda_{avant} = 0{,}9$ cm	$3\lambda_{avant} = ?$

AN : $3\lambda_{avant} = \dfrac{0{,}9\times100}{3{,}6} = 25$ mm

On en déduit : $\lambda_{avant} = \dfrac{25}{3} = 8{,}3$ mm

De même, après l'obstacle, en comptant 6λ : $6\lambda = 1{,}8$ cm sur la photo, alors $\lambda = 0{,}3$ cm sur la photo. Par proportionnalité :

3,6 cm	100 mm
$\lambda_{après} = 0{,}3$ cm	$\lambda_{après} = ?$

AN : $\lambda_{après} = \dfrac{0{,}3\times100}{3{,}6} = 8{,}3$ mm

On en conclut que l'onde, bien que diffractée, ne change pas de longueur d'onde après l'obstacle.

2. On rappelle l'expression de l'angle caractéristique de diffraction : $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$.

a se détermine en mesurant à la règle sur la photo la largeur de l'ouverture et en posant le tableau de proportionnalité :

3,6 cm	100 mm
$a = 0{,}2$ cm	$a = ?$

AN : $a = \dfrac{0{,}2 \times 100}{3{,}6} = 5{,}6$ mm

$\theta = \dfrac{8{,}3}{5{,}6} = 1{,}50$ rad $= 86°$

Avec un rapporteur, on peut bien le mettre en évidence sur la photo.

15 **1. a.** Pour une fente verticale, la figure de diffraction est horizontale : elle est donc perpendiculaire à la fente.

b. Plus la fente est fine, plus la tache centrale de diffraction est grande, c'est donc la fente 3.

2. a. Dans l'approximation des petits angles, $\tan\theta \approx \theta$.

$\tan\theta = \dfrac{L}{2D}$ et $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$. On obtient : $\dfrac{L}{2D} = \dfrac{\lambda}{a}$.

Cela permet d'isoler a : $a = \dfrac{2\lambda \cdot D}{L}$.

Au préalable, il faut mesurer L, la largeur de la tache centrale de la fente 3 (à l'échelle ½).

On mesure 2 L comme indiqué par la flèche sur le schéma ci-dessous.

Sur le manuel de l'élève, 2 L = 2,9 cm, ce qui représente, à l'échelle ½ : 2 L = 5,8 cm.

En réalité, $L = \dfrac{5{,}8}{2} = 2{,}9$ cm $= 0{,}029$ m

AN : $a = \dfrac{2 \times 633 \times 10^{-9} \times 3{,}2}{0{,}029} = 1{,}4 \times 10^{-4}$ m

$= 1{,}4 \times 10^{2}$ µm

La fente la plus fine mesure donc $1{,}4 \times 10^{2}$ µm.

b. Si on éclaire avec un laser bleu de longueur d'onde 405 nm, $L = \dfrac{2\lambda \cdot D}{a}$:

AN : $L = \dfrac{2 \times 405 \times 10^{-9} \times 3{,}2}{1{,}4 \times 10^{-4}} = 0{,}019$ m $= 1{,}9$ cm

Éclairée par un laser bleu, cette même fente donnerait une tache de diffraction plus petite, de largeur 1,9 cm.

› 3. Interférences de deux ondes

16 **1. a.** La différence de chemin entre les deux points vaut $\delta = 4 - 1 = 3$ m et, puisque la longueur d'onde vaut 2 m, le point est tel que $\delta = (2k+1) \cdot \dfrac{\lambda}{2}$. Ici, $\delta = 3 \times \dfrac{\lambda}{2}$. Il est donc sur un minimum d'amplitude.

b. On les qualifie d'interférences destructives.

2. La différence de chemin entre les deux points vaut : $\delta = 14 - 6 = 8$ m. Le point est tel que $\delta = k \cdot \lambda$. Ici, $\delta = 4\lambda$. Il est donc sur un maximum d'amplitude. On parle d'interférences constructives.

17 *Sur le manuel de l'élève et les manuels numériques, les titres des schémas ont été supprimés, contrairement au spécimen du professeur.*

1. Les deux ondes sont qualifiées de synchrones ou cohérentes parce qu'elles vibrent à la même fréquence avec un déphasage constant.

2. Situation **A** : les deux ondes sont en opposition de phase, c'est-à-dire que lorsqu'une est au maximum, l'autre est au minimum ; si l'une est croissante, l'autre est décroissante, etc. Leur superposition donne des interférences destructives et la zone est sombre.

Situation **B** : les deux ondes sont en phase, c'est-à-dire que les ondes sont au maximum ensemble ou au minimum ensemble ; elles ont le même sens de variation. Leur superposition donne des interférences constructives et la zone est éclairée.

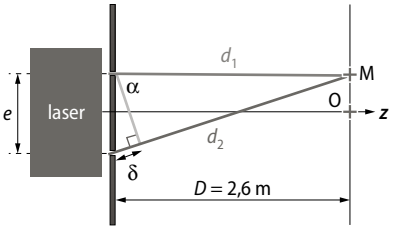
Situation **C** : les ondes sont décalées d'un déphasage quelconque, il n'y a ni interférences constructives ni interférences destructives, la zone est donc peu éclairée.

3. Situation **A** : on n'entendrait rien.

Situation **B** : on entendrait le son avec deux fois plus d'intensité.

Situation **C** : on n'entend ni le son deux fois plus fort, ni le son assourdi. On pourrait dire que l'on entend le son d'un niveau intermédiaire entre le maximum et le minimum.

18 **1. a.** La différence de chemin optique est $\delta = d_2 - d_1$, ce qui donne sur le schéma :



b. Le point O au centre de l'écran est sur une frange brillante, car il est tel que $\delta = 0$. En effet, les interférences sont constructives si $\delta = k \cdot \lambda$, et ici, $k = 0$.

2. Il y aura le premier maximum d'intensité lumineuse pour $\delta = \lambda$, et ici $k = 1$ (1er maximum d'amplitude).

3. Puisque $\delta = \dfrac{e \cdot x}{D}$, que $x = i$ et $\delta = \lambda$, alors $\delta = \dfrac{e \cdot i}{D} = \lambda$, ce qui permet d'écrire :

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{e}$$

4. On en déduit que l'écartement entre les trous s'exprime :

$$e = \frac{\lambda \cdot D}{i}$$

AN : $e = \dfrac{633 \times 10^{-9} \times 2{,}6}{3{,}4 \times 10^{-3}} = 4{,}8 \times 10^{-4}\ \text{m} = 480\ \mu\text{m}$

L'écartement entre les deux trous mesure donc 480 µm.

› 4. Effet Doppler

19 **1.** Puisque la fréquence augmente lorsque la source se rapproche du récepteur, et que $\lambda = \dfrac{c}{f}$, c'est l'inverse pour la longueur d'onde : lorsque la source se rapproche, la longueur d'onde diminue (on parle de décalage vers le bleu, ou *blueshift*). Quand la source s'éloigne, la longueur d'onde augmente (on parle de décalage vers le rouge, ou *redshift*).
Ici, il s'agit donc de l'étoile A qui s'éloigne du Soleil, tandis que l'étoile B se rapproche de lui.

2. C'est l'étoile A qui a le décalage le plus grand et, comme la vitesse est proportionnelle au décalage $v = \dfrac{\Delta\lambda \cdot c}{\lambda_e}$, c'est l'étoile A qui a la vitesse la plus élevée dans la direction d'observation.

20 **1.** 200 battements par seconde correspondent à une fréquence des battements égale à 200 Hz.
On peut calculer le décalage Doppler : $\Delta f = \dfrac{f \cdot v}{c}$.

AN : $\Delta f = \dfrac{200 \times 7}{340} = 4{,}1\ \text{Hz}$

La fréquence du son perçu lorsqu'il se rapproche est donc :

$$f + \Delta f = 200 + 4 = 204\ \text{Hz}$$

2. Si un autre bourdon vole à la même vitesse à côté de lui, il est comme immobile par rapport à celui-ci, il perçoit donc la même fréquence, soit 200 Hz.

Faire le point avant d'aller plus loin p. 443

◗ ***Écrire la relation qui lie le niveau d'intensité sonore et l'intensité sonore.***

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

◗ ***Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.***
Lorsqu'on s'éloigne de la source sonore, le niveau d'intensité sonore diminue : c'est l'atténuation géométrique. Si l'on interpose un matériau entre la source et le détecteur, le niveau d'intensité sonore diminue : c'est l'atténuation par absorption.

◗ ***Citer le phénomène de diffraction d'une onde dans des situations variées.***
Le phénomène de diffraction se produit avec les ondes sonores/ultrasonores en permettant de détecter des sons sans être en face d'une ouverture, et avec les ondes électromagnétiques, comme la lumière visible. Cela permet de mesurer une longueur d'onde ou bien la taille d'une très petite ouverture.
Avec les rayons X, cela permet de déterminer la distance entre deux plans d'atomes voisins.

◗ ***Écrire la relation entre l'angle caractéristique de diffraction et la longueur d'onde.***

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

◗ ***Citer le phénomène d'interférences dans des situations variées et les conséquences concrètes qui en découlent.***
Le phénomène d'interférences se produit avec les ondes sonores/ultrasonores en permettant de supprimer le bruit ambiant, comme dans les casques anti-bruit, et avec les ondes électromagnétiques, comme la lumière visible. Cela permet de mesurer une longueur d'onde ou bien la distance entre deux ouvertures.

◗ ***Écrire les conditions d'interférences constructives/destructives de deux ondes ponctuelles en phase.***
Les interférences sont constructives si les ondes sont décalées de :

$$\delta = k \cdot \lambda\ (k \text{ entier})$$

Les interférences sont destructives si les ondes sont décalées de :

$$\delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}\ (k \text{ entier})$$

◗ ***Établir l'expression de l'interfrange.***
Il faut savoir démontrer que $i = \dfrac{\lambda \cdot D}{e}$.
En résumé, puisque la différence de chemin optique est $\delta = \dfrac{e \cdot x}{D}$ et que la première extinction a lieu pour $x = i$ et $\delta = 1 \times \lambda$, alors $\delta = \dfrac{e \cdot i}{D} = \lambda$, ce qui permet d'écrire :

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{e}$$

◗ ***Citer les observations correspondant à l'effet Doppler.***
Une source sonore de fréquence f est en mouvement rectiligne par rapport à un observateur

fixe. Le son est perçu par l'observateur plus aigu (fréquence plus grande $f' > f$) quand la source se rapproche de lui. Au contraire, lorsque la source s'éloigne, le son perçu est plus grave (fréquence plus petite $f' < f$).

◗ ***Établir l'expression du décalage Doppler.***
Il faut connaître la démonstration du cours p. 438 pour établir que le décalage Doppler est : $\Delta f = \dfrac{f \cdot v}{c}$.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 444

22 **1.** La diffraction est le phénomène au cours duquel une onde qui traverse une ouverture change de direction de propagation sans modification de longueur d'onde. Le phénomène de diffraction est d'autant plus observable si a, la largeur de l'ouverture, est plus petite que la longueur d'onde λ (ou du même ordre de grandeur).

2. La diffraction met en évidence le caractère ondulatoire de la lumière.

3. La tache centrale s'étend sur la courbe expérimentale entre les deux premiers minimums : de – 0,014 à + 0,014, ce qui donne :
$d_{\text{Airy}} = 0{,}028 \text{ m} = 2{,}8 \text{ cm}$.

24 **1.** En comptant 5λ, on mesure 1,25 cm, soit $\lambda = 0{,}25$ cm sur le papier (dimensions du manuel élève). Mais l'échelle fournie indique que 0,7 cm représente 1 m.
On détermine, par proportionnalité,
$\lambda = \dfrac{0{,}25 \times 1}{0{,}7} = 0{,}357$ m.
On en déduit la fréquence de l'hélicoptère : $f = \dfrac{c}{\lambda}$.
AN : $f = \dfrac{340}{0{,}357} = 952$ Hz.
La fréquence perçue vaut donc 952 Hz.
Le son est alors perçu plus aigu, car la fréquence augmente.

2. En utilisant le décalage Doppler, $\Delta f = \dfrac{f \cdot v}{c}$, on peut isoler :
$v = \dfrac{\Delta f \cdot c}{f}$
AN :
$v = \dfrac{(952 - 810) \times 340}{810} = 59{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 215 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
On peut donc estimer la vitesse de l'hélicoptère à 215 km · h^{-1}, ce qui paraît réaliste pour cet engin.

S'entraîner pour maîtriser

p. 446

25 **1.** L'angle caractéristique de diffraction s'écrit : $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$.
Pour les petits angles : $\theta \approx \tan\theta = \dfrac{L}{2D}$.
Alors $\dfrac{\lambda}{a} = \dfrac{L}{2D}$.

2. En travaillant avec des expressions littérales, il faut donc isoler la largeur de la tache centrale de diffraction L dans la relation ci-dessus : $L = \dfrac{2\lambda \cdot D}{a}$, puis remplacer par les valeurs, bien converties en mètre :
1 nm = 10^{-9} m ; 1 cm = 10^{-2} m ; 1 µm = 10^{-6} m.

• pour le bleu :
$L_B = \dfrac{2 \times 405 \times 10^{-9} \times 220 \times 10^{-2}}{200 \times 10^{-6}} = 9{,}0$ mm

• pour le vert, il faut changer la longueur d'onde :
$L_V = \dfrac{2 \times 525 \times 10^{-9} \times 220 \times 10^{-2}}{200 \times 10^{-6}} = 12$ mm

• idem pour le rouge :
$L_R = \dfrac{2 \times 650 \times 10^{-9} \times 220 \times 10^{-2}}{200 \times 10^{-6}} = 14$ mm

3. a. Le point central de la figure de diffraction reçoit toutes les couleurs, donc d'après la synthèse additive fournie, il est blanc.
b. La tache centrale, qui mesure 9 mm pour le bleu, est en réalité répartie de – 4,5 mm à + 4,5 mm. Donc à $x = 4{,}5$ mm, il y a la première extinction du bleu, il ne se superpose que le rouge et le vert. D'après la synthèse additive des couleurs, la couleur résultante est jaune.
c. De même, à $x = 7$ mm, il y a la première extinction du rouge, il ne se superpose que le bleu et le vert. D'après la synthèse additive des couleurs, la couleur résultante est cyan.

4. La synthèse additive des couleurs permet d'expliquer la figure de diffraction en lumière blanche comme étant la superposition de chacune des figures de diffraction de chaque couleur qui la compose.

26 **1. a.** Le retard τ est la durée que met le bip sonore à se propager à une distance d de la source.
b. Puisque le train est immobile, alors l'observateur sur le quai entend la même fréquence (et donc avec des périodes identiques) que l'émetteur : $T = T_0$.

2. a. On a $T' = T_0 \cdot (1 - \dfrac{v}{c_{\text{son}}})$,

donc $T' > T_0$ car $1 - \frac{v}{c_{son}} > 1$.

Comme $f = \frac{1}{T}$, on en déduit que $f' > f_0$. La fréquence perçue f' est donc supérieure à f_0, ce qui est logique car l'émetteur se rapproche du récepteur : le son paraît plus aigu.

b. Il faut au préalable convertir la vitesse en $m \cdot s^{-1}$:

$v = 120 \text{ km} \cdot h^{-1} = \frac{120}{3,6} = 33,3 \text{ m} \cdot s^{-1}$.

Il faut ensuite déterminer le décalage Doppler :

$\Delta f = \frac{f \cdot v}{c_{son}}$

AN : $\Delta f = \frac{440 \times 33,3}{340} = 43,1$ Hz

La fréquence perçue par un observateur sur le quai est :

$f' = f_0 + \Delta f = 440 + 43 = 483$ Hz.

Cette fréquence se rapproche davantage de la note *si*, de fréquence 493 Hz.

27 Pour la batterie, le sonomètre indique 70 dB. On en déduit que l'intensité sonore vaut $I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$.

$I_1 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{70}{10}} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Pour la guitare, le sonomètre indique 68 dB. On en déduit que l'intensité sonore vaut :

$I_2 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{68}{10}} = 6,3 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Pour le piano, le sonomètre indique 65 dB. On en déduit que l'intensité sonore vaut :

$I_3 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{65}{10}} = 3,2 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Pour la chanteuse, le sonomètre indique 66 dB. On en déduit que l'intensité sonore vaut :

$I_4 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{66}{10}} = 4,0 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Comme seules les intensités sonores s'additionnent :

$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$
$= 1,0 \times 10^{-5} + 6,3 \times 10^{-6} + 3,2 \times 10^{-6} + 4,0 \times 10^{-6}$
$= 2,35 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

On peut calculer le niveau d'intensité sonore : $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$.

AN : $L = 10 \log\left(\frac{2,35 \times 10^{-5}}{1,0 \times 10^{-12}}\right) = 73,7$ dB

Le niveau d'intensité sonore total lorsque tous les instruments jouent ensemble vaut 74 dB (on conserve 2 chiffres significatifs, comme dans les données de l'énoncé).

28 **1.** Le niveau d'intensité sonore s'exprime avec une fonction logarithme décimal (log). La fonction logarithme décimal n'est pas additive comme une fonction linéaire : $\log a + \log b \neq \log (a + b)$.

2. a. Lorsqu'un percussionniste a un niveau sonore de 87 dB et qu'une guitare électrique en a un de 91 dB, la différence est de 4 dB, ce qui équivaut, par lecture graphique, à ajouter 1,5 dB à l'abscisse : le niveau d'intensité sonore résultant est de :

$91 + 1,5 = 92,5$ dB.

b. Lorsque deux flûtistes jouent ensemble avec la même intensité sonore, la différence de niveau d'intensité sonore est nulle, alors il faut lire l'ordonnée à l'origine, soit 3 dB. Le niveau d'intensité sonore des deux flûtistes équivaut à $82 + 3 = 85$ dB.

29 **› Démarche experte**

Les interférences constructives sont recherchées telles que $\delta = k \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta$.

La distance doit être la plus petite entre deux plans voisins successifs, soit $k = 1$.

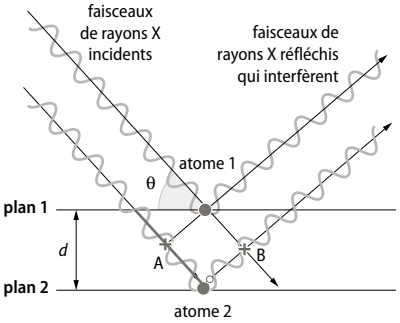
On peut isoler $d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$.

AN : $d = \frac{145}{2 \times \sin 11,5°} = 364$ pm (il n'est pas nécessaire de convertir les picomètres en mètres, on obtiendra la distance interplans directement en picomètres et on conservera 3 chiffres significatifs comme dans les données de l'énoncé).

La distance minimale entre deux plans est donc 364 pm.

› Démarche avancée

1. La différence de chemin optique vient de la différence de parcours des deux ondes incidentes et réfléchies.



Elle correspond à deux fois la longueur du segment gris, qui se calcule en utilisant la formule du cosinus :

$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \frac{\text{coté adjacent}}{\text{hypoténuse}} = \frac{d}{\delta / 2}$.

Or $\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \sin\theta$, donc $\delta = 2d \cdot \sin\theta$.

2. Les interférences constructives se produisent quand $\delta = k \cdot \lambda$.
Les interférences destructives se produisent quand $\delta = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$.

3. Pour une différence de chemin optique minimale, et pour des interférences constructives, il faut prendre $k = 1$:

$\delta = \lambda = 2d \cdot \sin\theta$, ce qui permet d'isoler $d = \frac{\lambda}{2 \sin\theta}$.

AN : $d = \frac{145}{2 \sin 11{,}5°} = 364$ pm (ne pas convertir les picomètres en mètres, on obtiendra la distance interplans directement en picomètres et on conservera 3 chiffres significatifs comme dans les données de l'énoncé).
La distance minimale entre deux plans est donc 364 pm.

30 *Sirène d'un camion de pompier*

La sirène d'un camion de pompier émet un son de fréquence 800 Hz. Vous êtes sur le trottoir. Si le camion de pompier s'approche de vous à la vitesse de 30 m · s⁻¹, quelle fréquence allez-vous entendre si :
1. *le camion de pompier se rapproche de vous ?*
2. *le camion de pompier s'éloigne de vous ?*
On prendra la célérité du son dans l'air égale à 340 m · s⁻¹.

1. Il faut tout d'abord déterminer le décalage Doppler : $\Delta f = \frac{f \cdot v}{c}$.

AN : $\Delta f = \frac{800 \times 30}{340} = 71$ Hz

La fréquence perçue par un observateur sur le trottoir, lorsque le camion s'approche, est :
$f + \Delta f = 800 + 71 = 871$ Hz

2. Lorsque le camion s'éloigne à la même vitesse, le décalage Doppler ne change pas. La fréquence perçue par un observateur sur le trottoir est :
$f - \Delta f = 800 - 71 = 729$ Hz

31 **1. a.** Il faut utiliser la relation fournie dans l'énoncé :

$v = \frac{v_{\text{ultrason}} \cdot \Delta f}{2 \cdot \cos\theta \cdot f_E}$

AN :

$v = \frac{1\,570 \times 1{,}5 \times 10^3}{2 \times \cos 45° \times 10 \times 10^6} = 0{,}17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 17 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

b. Par lecture graphique sur la figure A, on peut identifier soit des artérioles, soit des veines.

2. On isole Δf dans la relation précédente :

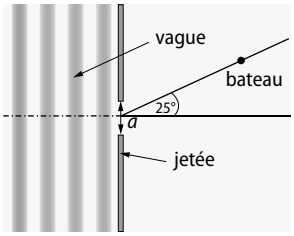
$\Delta f = \frac{2 \cdot v \cdot \cos\theta \cdot f_E}{v_{\text{ultrason}}}$.

Dans cette formule, seule f_E augmente, les autres paramètres étant inchangés. Comme f_E est au numérateur, si f_E augmente, alors Δf augmente aussi. Δf est proportionnel à f_E.

32 **1.** L'angle caractéristique de diffraction s'écrit : $\theta = \frac{\lambda}{a}$.

AN : $\theta = \frac{15{,}7}{36{,}0} = 0{,}436$ rad $= 25$ °

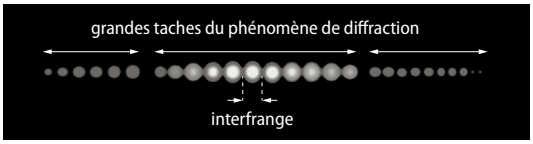
2. Avec un rapporteur, on mesure l'angle entre le bateau et la droite en pointillés ayant pour origine le centre de l'ouverture. Le bateau se trouve exactement à 25° : il est donc sur la première extinction et ne va pas ressentir les vagues dues au phénomène de diffraction.



33 **Exemple d'exposé oral**

Il faut avant tout préciser que l'on reconnaît deux figures : l'une de **diffraction par une ouverture** (en haut), l'autre d'**interférences de deux ondes lumineuses** dues à la traversée de la lumière du laser dans 2 fentes (en bas), ce qui donne des interférences de deux ondes lumineuses. Le protocole expérimental est assez similaire pour les deux montages : une source monochromatique de longueur d'onde λ éclaire soit une fente de largeur a, soit deux fentes identiques espacées d'un écart e. La figure de diffraction est observée sur un écran situé à une distance D des fentes. Pour obtenir les courbes d'intensité, il faut capturer l'image de la figure sur l'écran en prenant soin d'inscrire une échelle, puis il faut exploiter cette image dans un logiciel de traitement d'images afin de tracer la courbe d'intensité lumineuse.
Concernant la figure de diffraction par une ouverture, plus la fente est fine, plus le faisceau lumineux s'écarte : la tache centrale de diffraction est de plus en plus large. Cette diffraction du faisceau lumineux est repérée avec un angle caractéristique de diffraction : $\theta = \frac{\lambda}{a}$.

Concernant la figure d'interférences, celle obtenue à deux fentes, le montage expérimental et l'acquisition sont les mêmes, si ce n'est qu'il faut échanger la fente par une double fente. La figure observée sur l'écran est quelque peu différente : on observe l'« enveloppe » de la figure de diffraction avec, à l'intérieur des interfranges, une alternance de pics de lumière et de zones d'obscurité.



Cette figure d'interférences et celle de diffraction montrent le caractère ondulatoire de la lumière. Pour les interférences, elle s'explique notamment par la **différence de chemin optique** $\delta = d_2 - d_1$, distance d'un point de l'écran aux deux sources de lumière S_1 et S_2.

On peut interpréter l'alternance de pics de lumière et d'obscurité par la superposition géométrique de deux ondes lumineuses.

• Lorsqu'elles sont en phase, on parle d'**interférences constructives**, ce qui correspond au maximum de luminosité (ou franges brillantes). Cela se produit lorsque la différence de chemin optique est un multiple de la longueur d'onde, ce qui s'écrit : $\delta = k \cdot \lambda$ (k entier).

• Lorsque les deux ondes sont en opposition de phase, on parle d'**interférences destructives**, qui se produisent quand $\delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$. Cela correspond au minimum d'intensité lumineuse : on parle de franges sombres.

La relation de l'interfrange i est fonction de la distance D, de la longueur d'onde λ et de l'écart e : $i = \frac{\lambda \cdot D}{e}$.

34 Exemple d'exposé oral

La première fonction des casques audio est de pouvoir écouter sa musique préférée ou regarder sa série sans être dérangé par tous les bruits alentours : on appelle cela la pollution sonore.

Les casques audio disposent depuis longtemps de mousses placées autour des écouteurs. Outre le confort qu'elles apportent, ces mousses permettent d'atténuer le bruit ambiant, mais pas totalement : on parle d'atténuation passive. On ne peut pas exagérément augmenter l'épaisseur du matériau isolant, du fait de l'encombrement et de l'esthétisme. On peut toutefois atteindre l'ordre de 20 dB d'atténuation sonore de l'environnement.

Depuis quelques années, un dispositif dit « actif » permet d'atténuer considérablement le bruit ambiant indésirable. Le casque avec réduction de bruit est équipé de deux microphones, un près de chaque oreille. Il utilise le principe des interférences, longuement étudié dans ce chapitre. À chaque son qu'il capte, il « fabrique » un son de même fréquence, mais décalé pour qu'il soit en opposition de phase par rapport au bruit ambiant. Il y a alors interférences destructives et les deux ondes s'annulent : le son ambiant n'est plus perceptible. Dans le cas des casques audio à réduction de bruit que l'on trouve aujourd'hui, l'onde sonore opposée au bruit est ajoutée au son de la musique que l'on écoute. Elle annule ce bruit et l'auditeur n'entend plus que sa musique préférée !

Les casques les plus performants, en 2020, utilisent 4 micros par oreille pour avoir une meilleure étendue de la fréquence des sons captés à annihiler (à l'instar des enceintes de qualité qui ont des haut-parleurs de différents diamètres pour émettre dans la bande de fréquence la plus large et fidèle possible). Le tout est ensuite analysé et traité avec des logiciels de plus en plus performants et rapides.

Développer ses compétences p. 449

35 › Questions préliminaires

1. Les ondes lumineuses arrivent en phase sur les deux télescopes et, comme le détecteur est à égale distance des deux télescopes, il y a une différence de chemin optique nulle : $\delta = 0$.

2. En ajoutant un décalage d'une demi-période $\frac{T}{2}$, les deux signaux provenant de l'étoile sont alors en opposition de phase. Cela provoque des interférences destructives : le système optique élimine la lumière provenant de l'étoile. Seule la lumière de l'exoplanète va pouvoir interférer de manière constructive.

3. Le télescope a donc un retard dû à l'inclinaison des rayons de l'exoplanète et un retard d'une demi-période à ajouter après le télescope 2, soit : $\tau' = \tau + \frac{T}{2} = \frac{d \cdot \sin\alpha}{c} + \frac{T}{2}$, où τ' est le retard issu du télescope 2 par rapport au signal reçu par le télescope 1.

› Problématique

Les interférences constructives obtenues pour les ondes lumineuses venant de l'exoplanète vont respecter les conditions $\delta = k \cdot \lambda$. Cela revient à dire que les signaux sont en phase, ou que le retard est multiple d'une période T.

Cela donne : $\frac{d \cdot \sin\alpha}{c} + \frac{T}{2} = k \cdot T = T$ (si l'on veut une distance minimale entre les deux télescopes, il faut choisir $k = 1$).

Soit $\frac{d \cdot \sin\alpha}{c} = T - \frac{T}{2} = \frac{T}{2}$.

On peut isoler la distance d : $d = \frac{c \cdot T}{2 \cdot \sin\alpha}$

Or, d'après le document 4 : $\sin\alpha = \frac{r}{d_{\text{Terre–étoile}}}$, et comme $\lambda = c \cdot T$, l'expression de la distance d devient :

$d = \frac{\lambda \cdot d_{\text{Terre–étoile}}}{2r}$

AN : $d = \frac{10{,}0 \times 10^{-6} \times 2{,}18 \times 10^{18}}{2 \times 8{,}23 \times 10^{12}} = 1{,}32$ m

(on conserve 3 chiffres significatifs au vu des données). La distance entre les deux télescopes doit donc être au minimum de 1,32 m.

36 • *Première piste :*

Calculons la vitesse d'éloignement de la galaxie NGC 691 avec l'expression fournie :

$v = c \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$

Pour déterminer $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, on mesure la longueur d'onde médiane du doublet du calcium pour la galaxie (doc. 2) : $\lambda = 531{,}5$ nm.

Donc $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 531{,}5 - 526{,}8 = 4{,}700$ nm.

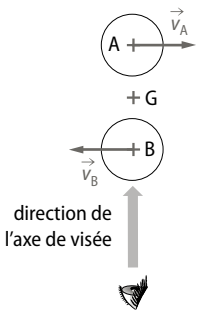
AN : $v = 2{,}9979 \times 10^8 \times \frac{4{,}700}{526{,}8} = 2{,}675 \times 10^6$ m · s^{-1}

La vitesse de cette galaxie est donc de $2{,}675 \times 10^6$ m · s^{-1} (on conserve 4 chiffres significatifs au vu des données)

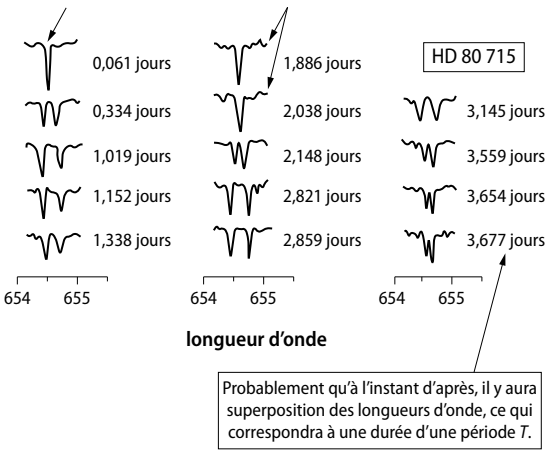
• *Deuxième piste :*

D'après le doc. 3, si l'étoile A s'éloigne, la longueur d'onde se décale vers le rouge, c'est-à-dire vers les grandes longueurs d'onde. À l'inverse, l'étoile B se rapproche de l'axe de visée, la longueur d'onde se décale vers le bleu, c'est-à-dire vers les petites longueurs d'onde.

Il est bon de noter que lorsque la vitesse est perpendiculaire à l'axe de visée, le décalage est nul : il n'y aura qu'un seul pic. Dans ce cas, $\lambda_A = \lambda_B$.



Référence où les étoiles ont des vitesses perpendiculaires à l'axe de visée :



La période de rotation des étoiles est d'environ 3,8 jours.

› Conclusion

Par ces deux pistes, on a pu montrer qu'on peut calculer la vitesse d'une étoile ou d'une galaxie par mesure du décalage de longueur d'onde par rapport à celles mesurées sur Terre. Cela permet de déterminer une vitesse en utilisant la relation :

$v = c \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$

Par ailleurs, l'effet Doppler permet aussi de détecter des étoiles doubles, surtout lorsqu'elles ne sont pas détectables avec un instrument d'optique. On procède en déterminant la période de répétition du décalage de longueur d'onde entre les deux étoiles en rotation l'une par rapport à l'autre.

37 **› Questions préliminaires**

1. La relation de l'angle caractéristique de diffraction est : $\theta_0 = \frac{\lambda}{a}$.

2. $\theta_0 \approx \tan\theta_0 = \frac{L}{2D}$. On obtient alors $\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$.

Il faut isoler la largeur de la tache centrale de diffraction L dans la relation ci-dessus :

$L = \frac{2\lambda \cdot D}{a}$, ce qui peut aussi s'écrire $L = k \cdot \frac{1}{a}$ avec $k = 2\lambda \cdot D$

› Le problème à résoudre

L'équation de la courbe du document 2 est celle d'une droite linéaire : $y = k \cdot x$.

Pour déterminer le coefficient directeur k, il suffit de prendre un point de la droite et de diviser son ordonnée y par son abscisse x : $k = \frac{y}{x}$.

Prenons $k = \dfrac{12{,}3 \times 10^{-2}}{5{,}00 \times 10^{4}} = 2{,}46 \times 10^{-6}$ m².

Ce coefficient k est aussi égal à $k = 2\lambda \cdot D$.

On peut donc extraire la longueur d'onde λ :

$$\lambda = \frac{k}{2D} = \frac{2{,}46 \times 10^{-6}}{2 \times 2{,}00} = 6{,}15 \times 10^{-7}\ \text{m} = 615\ \text{nm}$$

Il s'agit probablement de la diode laser de 632 nm, la plus proche du résultat obtenu.

On peut déterminer l'incertitude-type :

$$u(\lambda) = \lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(k)}{k}\right)^2}$$

On estime se tromper de 1 mm sur la lecture des 2,00 m de la distance D.

$$u(\lambda) = 615 \times 10^{-9} \times \sqrt{\left(\frac{0{,}1}{200}\right)^2 + \left(\frac{1{,}2 \times 10^{-7}}{2{,}46 \times 10^{-6}}\right)^2}$$

$u(\lambda) = 3 \times 10^{-8}$ m = 30 nm.

Ainsi, la longueur d'onde de 615 nm est connue à 30 nm près : la valeur de 632 nm appartient bien à cet intervalle. Cela confirme que c'est bien la diode laser de longueur d'onde 632 nm qui est utilisée ici.

38 **1. a.** Appliquons le théorème de Pythagore dans le triangle OHC rectangle en H :

$OH^2 + HC^2 = OC^2$

Avec $OC = R$, $OH = R - e$ et $HC = r$, on a :

$(R - e)^2 + r^2 = R^2$, ce qui, en développant l'identité remarquable, donne :

$R^2 - 2eR + e^2 + r^2 = R^2$

Soit $e^2 - 2eR + r^2 = 0$.

b. On écrit d'abord le discriminant Δ :

$\Delta = (2R)^2 - 4 \times 1 \times r^2 = 4(R^2 - r^2) > 0$.

Il y a deux racines réelles :

$$e_1 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a} \text{ et } e_2 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$e_1 = \frac{2R - \sqrt{4(R^2 - r^2)}}{2} = R - \sqrt{R^2 - r^2}$$

$$e_2 = \frac{2R + \sqrt{4(R^2 - r^2)}}{2} = R + \sqrt{R^2 - r^2}$$

La deuxième racine e_2 donne une solution physiquement impossible car $e_2 > R$. Seule e_1 est une solution physiquement possible.

c. D'après les données, la différence de chemin optique s'écrit ici :

$$\delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = 2(R - \sqrt{R^2 - r^2}) + \frac{\lambda}{2}$$

En factorisant par R : $\delta = 2R\left(1 - \sqrt{1 - \dfrac{r^2}{R^2}}\right) + \dfrac{\lambda}{2}$.

2. Avec l'approximation donnée, on a :

$$\delta = 2R\left(1 - \left(1 - \frac{r^2}{2R^2}\right)\right) + \frac{\lambda}{2} = 2R \cdot \frac{r^2}{2R^2} + \frac{\lambda}{2}$$

Donc $\delta = \dfrac{r^2}{R} + \dfrac{\lambda}{2}$.

Lorsqu'on observe un anneau sombre, il y a interférences destructives. La différence de chemin est telle que : $\delta = (2k + 1) \cdot \dfrac{\lambda}{2}$

On en déduit alors la relation :

$$\delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Soit $\dfrac{r^2}{R} = 2k \cdot \dfrac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda$

$r^2 = k \cdot \lambda \cdot R$

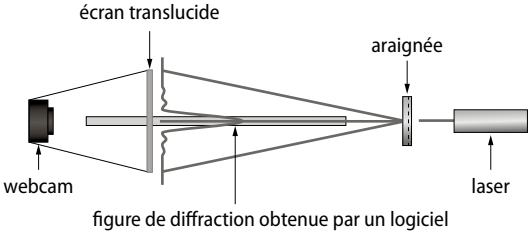
D'où la relation attendue : $r = \sqrt{R \cdot k \cdot \lambda}$.

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 452

1. Proposition de protocole expérimental

Représentation du montage à mettre en œuvre pour montrer l'influence du support du miroir secondaire à l'aide d'une webcam reliée à un ordinateur :

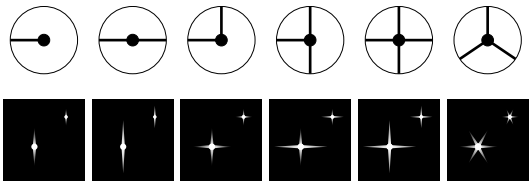


Il faut étudier différentes formes de supports pour constater leur influence sur la figure de diffraction. On peut commencer par montrer qu'un fil donne la même figure de diffraction qu'une fente de même dimension puis que, lorsque la fente est verticale, la figure de diffraction est horizontale. Lorsque le support du miroir secondaire est en croix, la figure de diffraction aussi.

Pour mesurer la tache centrale, on utilise un logiciel dédié.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental proposé

1. On met en œuvre le protocole et on effectue l'acquisition des photographies de chaque type de support. On s'attend à voir ce type de résultats :



2. Le support du miroir secondaire a une influence directe sur l'observation des étoiles : suivant le nombres de branches, l'image de l'étoile est « entachée » de traits lumineux, appelés aigrettes de diffraction.

3. On peut privilégier une forme de support et prévoir un lot de différents diamètres afin d'obtenir des largeurs L différentes de la tache centrale de diffraction. On en déduit, pour chaque mesure, l'angle caractéristique de diffraction en calculant :

$\theta = \dfrac{L}{2D}$, D étant la distance fil-écran.

L'incertitude-type associée s'écrit :

$$u(\theta) = \theta \cdot \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2}$$

3. Exploitation du résultat obtenu

1. À l'aide d'un tableur grapheur, il faut tracer la courbe $\theta = f(a)$. La modélisation par une fonction du type $\theta = k \cdot a^n$, doit donner une puissance $n = -1$ et un coefficient $k = \lambda$.

2. Comme sources d'incertitudes possibles, on peut évoquer les mesures de distances de D et L. Étant mesurées avec un mètre ruban, elles sont précises au mm.

CHAPITRE 18

Manuel p. 454

Formation d'images

LE PROGRAMME

2. Former des images, décrire la lumière par un flux de photons

A) Former des images

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Modèle optique d'une lunette astronomique avec objectif et oculaire convergents. Grossissement.	Représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes ; identifier l'objectif et l'oculaire. Représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale. Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale. Exploiter les données caractéristiques d'une lunette commerciale. *Réaliser une maquette de lunette astronomique ou utiliser une lunette commerciale pour en déterminer le grossissement.* *Vérifier la position de l'image intermédiaire en la visualisant sur un écran*

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 454

SITUATION 1

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien acquis le modèle de l'œil réduit, vu en classe de 2de, et la notion d'accommodation, vue en enseignement de spécialité de 1re.

Dans la situation proposée, il s'agit d'expliquer le principe de l'accommodation avec un vocabulaire adapté.

› Exemple de réponse attendue

Le cristallin de l'œil peut être modélisé par une lentille convergente. La distance cristallin-rétine étant invariable, ce sont les muscles ciliaires qui déforment le cristallin pour adapter la distance focale afin que l'image se forme sur la rétine.

› En classe de Terminale

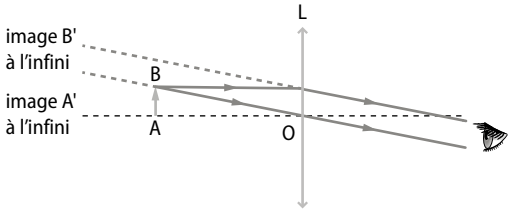
Les élèves découvriront la lunette astronomique, un instrument d'optique qui consiste en une association de deux lentilles minces convergentes. L'**activité 1** propose une démarche d'investigation permettant de comprendre le principe de fonctionnement d'une lunette afocale et de différencier les rôles respectifs de l'objectif et de l'oculaire.

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves connaissent les caractéristiques de l'image formée par une lentille convergente en fonction de la position de l'objet par rapport aux points caractéristiques de la lentille.

› Exemple de réponse attendue

Pour que l'image A'B' se forme à l'infini, il faut que les rayons lumineux qui proviennent du point B' émergent de la lentille parallèles entre eux. La construction graphique montre que l'objet doit alors être placé au niveau du foyer objet F de la lentille.



› En classe de Terminale

Le contexte de la lunette astronomique implique l'observation d'objets situés à l'infini. La lunette étant afocale, les images seront également situées à l'infini. Les élèves devront donc être à l'aise avec la conjugaison entre l'infini et les plans focaux d'une lentille convergente.

L'**activité 2** propose une réflexion sur la notion d'infini dans le cadre de l'optique géométrique.

SITUATION 3

Dans cette situation, les élèves sont invités à réinvestir les relations de grandissement et de conjugaison étudiées en enseignement de spécialité de 1re. Les données de l'énoncé permettent de vérifier que les élèves ont bien intégré l'utilisation des grandeurs algébriques.

› Exemple de réponse attendue

La valeur du grandissement peut se calculer en utilisant la relation $\overline{\gamma} = \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$.

La valeur de $\overline{OA}$ étant donnée, nous pouvons calculer $\overline{OA'}$ grâce à la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'} = \frac{1}{-6{,}0} + \frac{1}{7{,}5} \approx -0{,}033 \text{ cm}^{-1},$$

soit $\overline{OA'} = -30$ cm.

L'image est virtuelle et se situe à 30 cm de la lentille. Le grandissement vaut, dans ces conditions d'observation :

$$\overline{\gamma} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{-30}{-6} = 5$$

L'image observée par le gemmologue est 5 fois plus grande que l'objet.

› En classe de Terminale

Dans le contexte de la lunette afocale, les élèves découvriront que la détermination du grandissement n'a pas toujours de sens et qu'il peut être plus intéressant de définir le grossissement.

L'**activité 3** propose une démarche expérimentale au travers de laquelle les élèves découvriront la notion de grossissement.

ACTIVITÉS

p. 456 ACTIVITÉ 1

Maquette d'une lunette astronomique afocale

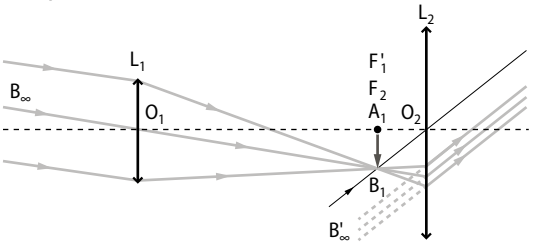
Commentaires pédagogiques

Cette activité permet aux élèves de découvrir le rôle des deux lentilles qui constituent une lunette astronomique, de les identifier et de comparer leur distance focale.

› Pistes de résolution

1. Pour observer une image grossie de l'objet, il faut placer la lentille de distance focale 33 cm du côté de l'objet, puis la lentille de distance focale 5,0 cm à environ 40 cm.

2. a., b. et **c.**



› Conclusion

3. a. La lentille qui joue le rôle de l'objectif a une distance focale plus élevée que celle qui joue le rôle de l'oculaire.

b. Pour que l'image de l'objet à l'infini soit observable sans accommodation, il faut que le foyer image de l'objectif coïncide avec le foyer objet de l'oculaire. La distance qui les sépare doit donc être égale à $f'_1 + f'_2$.

p. 457 ACTIVITÉ 2

L'infini, c'est loin ?

Commentaires pédagogiques

Cette activité a pour objectif de faire réfléchir les élèves sur la notion d'objet à l'infini. Ils sont invités à déterminer par le calcul la distance à partir de laquelle on peut considérer que l'incertitude sur la mesure d'une distance réalisée sur le banc d'optique masque l'approximation « objet à l'infini ». L'utilisation d'un tableur peut se révéler judicieuse pour réaliser les calculs de la question **2. c** et la question **4**.

› Exploitation et analyse

1. a. L'image intermédiaire A_1B_1 donnée par l'objectif d'un objet situé à l'infini se situe dans le plan du foyer image de l'objectif. Sur le doc. 1, A_1 coïncide avec F'_1.

b. Pour qu'un œil normal observe sans effort, il faut que l'image définitive A'B' donnée par l'oculaire soit située à l'infini : l'image intermédiaire A_1B_1 doit donc se situer dans le plan du foyer objet de l'oculaire : F_2 coïncide alors avec F'_1. La distance qui sépare l'objectif de l'oculaire est égale à $f'_1 + f'_2$.

2. a. La relation de conjugaison de Descartes appliquée à l'objectif s'écrit :

$$\frac{1}{\overline{O_1A_1}} = \frac{1}{\overline{O_1A}} + \frac{1}{f'_1}$$

Lorsqu'on vise un objet moins éloigné, $\dfrac{1}{\overline{O_1A}}$ ne tend pas vers 0 et $\overline{O_1A_1}$ n'est pas égal à f'_1.

Le signe de $\overline{O_1A}$ étant négatif, $\dfrac{1}{\overline{O_1A_1}} < \dfrac{1}{f'_1}$, donc $\overline{O_1A_1} > f'_1$. L'image intermédiaire A_1B_1 se situe après le foyer image F'_1.

b. L'image intermédiaire s'étant éloignée de l'objectif, il faut également éloigner l'oculaire de l'objectif pour que l'image définitive se forme à l'infini.

c. La relation de conjugaison de Newton appliquée à l'objectif nous permet de déterminer la position de l'image intermédiaire : $\overline{F_1'A_1} = \dfrac{-f_1'^2}{\overline{F_1A}}$.

• Si l'objet se situe à 1,0 km :

$$\overline{F_1'A_1} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1A}} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1O_1} + \overline{O_1A}} = \frac{-0{,}20^2}{0{,}20 - 1{,}0 \times 10^3} = 4{,}0 \times 10^{-5}\ \text{m}$$

• Si l'objet se situe à 100 m :

$$\overline{F_1'A_1} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1A}} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1O_1} + \overline{O_1A}} = \frac{-0{,}20^2}{0{,}20 - 1{,}0 \times 10^2} = 4{,}0 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

• Si l'objet se situe à 10 m :

$$\overline{F_1'A_1} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1A}} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1O_1} + \overline{O_1A}} = \frac{-0{,}20^2}{0{,}20 - 10} = 4{,}1 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

• Si l'objet se situe à 1,0 m :

$$\overline{F_1'A_1} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1A}} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1O_1} + \overline{O_1A}} = \frac{-0{,}20^2}{0{,}20 - 1{,}0} = 5{,}0 \times 10^{-2}\ \text{m}$$

Pour que l'image définitive soit observable sans effort, il faut que le foyer objet F_2 de l'oculaire coïncide avec la position de l'image intermédiaire. Il faudrait donc déplacer l'oculaire respectivement de 0,040 mm, 0,40 mm, 4,1 mm et 5,0 cm.

3. a. L'incertitude-type peut être estimée à la moitié de la plus petite graduation visible. Avec un banc d'optique gradué en millimètres : $u(d) = 0{,}5$ mm.

b. À la limite :

$$\overline{F_1'A_1} = 0{,}5\ \text{mm et } \overline{O_1A} = \frac{-f_1'^2}{\overline{F_1'A_1}} - f_1' \approx -80\ \text{m}$$

Tant que l'objet est situé à une distance supérieure à 80 m de l'objectif, l'approximation « objet éloigné » est masquée par l'incertitude liée à la mesure.

› Conclusion

4. Si la distance focale de l'objectif augmente, la distance limite augmente également. Avec un objectif de distance focale 20 cm, on peut considérer qu'un objet éloigné de plus de 80 m de la lunette astronomique est situé à l'infini.

p. 458 ACTIVITÉ 3

Caractéristiques d'une lunette afocale

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet d'établir un lien entre les données indiquées sur la notice d'une lunette commerciale et les caractéristiques d'une lunette modélisée sur banc d'optique au laboratoire.

› Expérimentation et exploitation

1. a. Lorsqu'on déplace l'ensemble {objectif - oculaire}, l'image définitive n'est pas modifiée.

b. L'image définitive est située à l'infini.

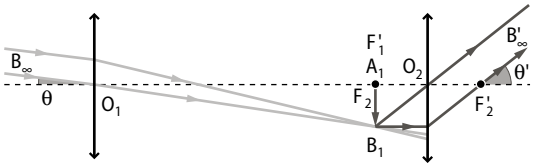
c. On retrouve approximativement : $O_1O_2 = f_1' + f_2'$.

d. Voir le schéma de la question **2. c**.

2. a. On observe l'image intermédiaire sur un écran situé à 33 cm environ de l'objectif, soit au niveau du foyer image de l'objectif.

b. L'image intermédiaire est renversée par rapport à l'objet.

c.



3. a. Dans les triangles $O_1A_1B_1$ et $O_2A_1B_1$ rectangles en A_1, on peut écrire respectivement :

$$\tan(\theta) \approx \theta = \frac{A_1B_1}{O_1A_1} = \frac{A_1B_1}{f_1'}$$

et $\tan(\theta') \approx \theta' = \dfrac{A_1B_1}{O_2A_1} = \dfrac{A_1B_1}{f_2'}$.

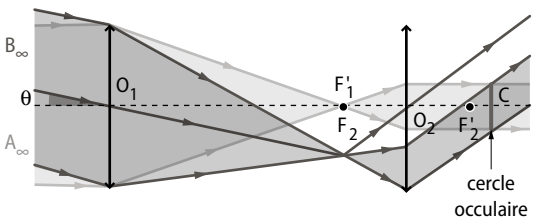
Soit $G = \dfrac{\theta'}{\theta} = \dfrac{f_1'}{f_2'}$.

b. Pour qu'une lunette grossisse, G doit être supérieur à 1, donc $f_1' > f_2'$. La distance focale de l'objectif est nécessairement plus grande que celle de l'oculaire.

c. $G = \dfrac{\theta'}{\theta} = \dfrac{f_1'}{f_2'} = \dfrac{33}{5{,}0} \approx 6{,}6$

› Exploitation et analyse

4. a.



b. Avec un objectif de diamètre 40 mm, sur le banc d'optique, on mesure $\overline{O_2C} = 5{,}8$ cm.
La taille de l'image sur l'écran mesure $d_{CO} = 0{,}7$ cm.
c. La relation de conjugaison appliquée à l'oculaire s'écrit :

$$\frac{1}{\overline{O_2C}} = \frac{1}{\overline{O_2O_1}} + \frac{1}{f_2'} = \frac{1}{-38} + \frac{1}{5{,}0} \approx 0{,}17 \text{ cm}^{-1}$$

Soit $\overline{O_2C} = 5{,}8$ cm.
La relation de grandissement appliquée à l'oculaire s'écrit :

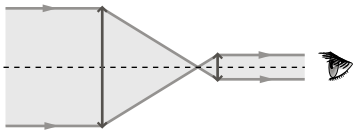
$$\overline{\gamma} = \frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_2O_1}} = \frac{-d_{CO}}{d_{objectif}}$$

Soit $d_{CO} = -d_{objectif} \cdot \frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_2O_1}} = -4 \times \frac{5{,}8}{-38} = 0{,}61$ cm

d. Le cercle oculaire correspond à l'endroit où passent tous les faisceaux lumineux qui pénètrent dans la lunette.

5. a. La luminosité de l'étoile est plus intense lorsqu'on l'observe à travers la lunette.
b.

Observation d'une étoile à l'œil nu



Observation d'une étoile à travers la lunette

c. Plus le diamètre de l'objectif sera grand, plus la quantité de lumière qui rentre dans la lunette sera importante.

› Conclusion

6. a. Les performances d'une lunette dépendent à la fois du grossissement et de la dimension de l'objectif : le premier nombre sans dimension correspond au grossissement de l'association objectif-oculaire et le second au diamètre (en mm) de l'objectif.
b. La lunette modélisée au laboratoire grossit environ 7 fois (question **3. c**) et son objectif a un diamètre de 40 mm (question **4. c**).

EXERCICES

Vérifier l'essentiel *p. 464*

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car l'oculaire est la lentille de sortie de la lunette.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la distance focale de l'objectif doit être beaucoup plus grande que celle de l'oculaire pour que l'image observée par la lunette soit grossie.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la distance focale de l'objectif doit être plus grande que celle de l'oculaire pour que l'image observée par la lunette soit grossie.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car il faut que $O_1O_2 = f_1' + f_2'$ pour qu'une lunette soit afocale : ici, $60 + 2 \neq 80$.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car il faut que $O_1O_2 = f_1' + f_2'$ pour qu'une lunette soit afocale : ici, $60 + 2 \neq 58$.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le faisceau émergent vient converger dans le plan focal image de l'objectif (qui coïncide avec le plan focal objet de l'oculaire) mais pas forcément sur le foyer image de l'objectif.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car la première lentille traversée par le faisceau provenant de l'infini est l'objectif.
La proposition C est une bonne réponse.

5 La proposition A n'est pas une bonne réponse car l'image B_1 d'un point B situé au-dessus de l'axe optique se forme en dessous de ce même axe : l'image intermédiaire est donc renversée par rapport à l'objet.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'image intermédiaire est observable sur un écran situé dans le plan focal image de l'objectif : elle est donc réelle.

6 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'image d'un objet à l'infini se forme dans le plan focal image de l'objectif qui coïncide avec le plan focal objet de l'oculaire dans le cas d'une lunette afocale.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car l'image observée à travers la lunette n'est pas visible sur un écran : elle est donc virtuelle. L'image B' d'un point B situé au-dessus de l'axe optique se forme en dessous de ce même axe : l'image définitive A'B' est donc renversée par rapport à l'objet.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la valeur absolue du grossissement doit être supérieure à 1 pour que l'image définitive soit grossie.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le grossissement d'une lunette afocale dépend uniquement des distances focales de l'objectif et de l'oculaire.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car $\left|\overline{G}\right| = \frac{f'_{\text{objectif}}}{f'_{\text{oculaire}}}$. La valeur absolue du grossissement est proportionnelle à f'_{objectif} et inversement proportionnelle à f'_{oculaire}.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C est une bonne réponse.

10 La proposition A n'est pas une bonne réponse car c'est au niveau du cercle oculaire (image de la monture de l'objectif par l'oculaire) que l'œil peut recevoir le maximum de lumière en provenance de l'objet visé.
La proposition B est une bonne réponse
La proposition C n'est pas une bonne réponse car c'est au niveau du cercle oculaire que l'œil peut recevoir le maximum de lumière en provenance de l'objet visé.

Acquérir les bases p. 465

› 1. Fonctionnement d'une lunette astronomique

11 **1.** Faux. Dans une lunette astronomique, la distance focale de l'oculaire est toujours plus petite que celle de l'objectif.

2. Vrai.

12 **1.** Pour que le grossissement soit le plus important possible, il faut choisir les lentilles de distances focales 50 et 300 mm.

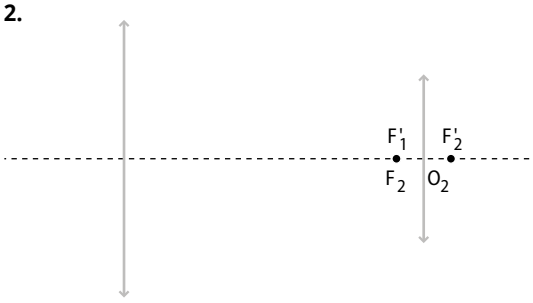
2. L'objectif a la plus grande valeur de distance focale soit 300 mm, la lentille de distance focale 50 mm jouera donc le rôle d'oculaire.

13 **1.** La modélisation **A** est correcte.

2. La modélisation **B** ne convient pas car la distance focale de l'objectif doit être plus grande que celle de l'oculaire.
La modélisation **C** ne convient pas car la lunette n'est pas afocale (F'_1 ne coïncide pas avec F_2).

14 **1.** Pour que la lunette soit afocale, il faut que $O_1O_2 = f'_1 + f'_2$. La distance qui sépare les deux lentilles doit donc être égale à 105 cm

2.



a. Avec une échelle 1/10 le long de l'axe optique, la distance $O_1O_2 = 105$ cm mesure $\frac{105}{10}$ soit 10,5 cm sur le schéma.
Avec une échelle 1/2 dans la direction perpendiculaire à l'axe optique, le diamètre de l'objectif mesure 5 cm sur le schéma ($\frac{10}{2}$) et le diamètre de l'oculaire mesure 3 cm sur le schéma ($\frac{6}{2}$).

b. La distance focale de l'oculaire mesurant 5 cm en réalité, sur le schéma :

$$F_2O_2 = O_2F'_2 = \frac{5}{10} = 0{,}5 \text{ cm}$$

La distance focale de l'objectif mesurant 100 cm en réalité, sur le schéma :

$$O_1F'_1 = \frac{100}{10} = 10 \text{ cm}$$

› 2. Formation des images

15 **1.** Application de la relation de conjugaison à l'objectif :

$$\frac{1}{\overline{O_1A_1}} = \frac{1}{\overline{O_1A}} + \frac{1}{f'_1}$$

L'objet AB étant à l'infini : $\overline{O_1A} \to \infty$, donc $\frac{1}{\overline{O_1A}} \to 0$
Soit $\overline{O_1A_1} = f'_1 = \overline{O_1F'_1}$.
Le point A_1 image du point A est donc confondu avec le foyer image F'_1 et l'image intermédiaire A_1B_1 se forme dans le plan focal image de l'objectif

2. Application de la relation de conjugaison à l'oculaire :

$$\frac{1}{\overline{O_2A'}} = \frac{1}{\overline{O_2A_1}} + \frac{1}{f'_2}.$$

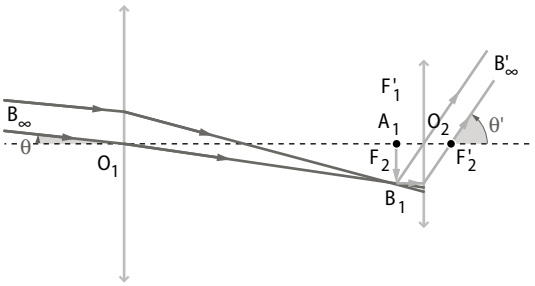
L'image A'B' doit être à l'infini pour qu'un œil normal observe sans accommoder :

$\overline{O_2A'} \to \infty$, donc $\frac{1}{\overline{O_2A'}} \to 0$.

Soit $\overline{O_2A_1} = -f'_2 = -\overline{O_2F'_2} = \overline{O_2F_2}$.

Le point A_1 image du point A est donc confondu avec le foyer objet F_2 et l'image intermédiaire A_1B_1 se forme dans le plan focal objet de l'oculaire.

16



1. Les deux rayons représentés en gris foncé arrivent sur l'objectif avec une inclinaison θ par rapport à l'axe optique

2. a. Il faut prolonger le rayon lumineux issu de B qui passe par le centre optique O_1 de l'objectif et qui n'est pas dévié : le point B_1 correspond à son intersection avec le plan focal image de l'objectif. Tous les rayons lumineux issus du point B viennent alors converger au point B_1.

b. L'image intermédiaire se forme dans le plan focal image de l'objectif qui coïncide avec le plan objet de l'oculaire.

3. a. À partir du point B_1, on trace (en gris clair) le rayon qui passe par O_2 sans être dévié et le rayon parallèle à l'axe optique qui émerge de l'oculaire en passant par F'_2. Ces deux rayons émergent de la lunette parallèles entre eux dans une même direction θ'.

b. Un œil normal n'accommodera pas pour observer l'image définitive A'B' car elle se forme à l'infini.

17 **1. a.** En appliquant les relations trigonométriques dans le triangle rectangle $O_1A_1B_1$, on obtient :

$A_1B_1 = \tan(\theta) \cdot f'_1$

$= \tan(0{,}51°) \times 80 = 0{,}7$ cm de haut.

b. Le grandissement est défini comme le rapport de la taille de l'image sur la taille de l'objet. Comme on n'a pas accès à la taille de l'objet, on ne peut pas déterminer le grandissement.

2. a. Pour que l'image définitive se forme à l'infini, il faut placer l'oculaire de telle manière que l'image intermédiaire A_1B_1 se forme dans le plan focal objet de l'oculaire. La distance entre l'objectif et l'oculaire vaut alors $O_1O_2 = f'_1 + f'_2 = 82$ cm.

b. L'image définitive est observée à travers la lunette, elle est donc virtuelle.

c. L'image définitive est dans le même sens que l'image intermédiaire, elle est donc renversée par rapport à l'objet.

› 3. Caractéristiques d'une lunette

18 **1.** Faux : $\overline{G} = -\dfrac{f'_1}{f'_2}$. Le grossissement de la lunette dépend des distances focales de l'objectif et de l'oculaire.

2. Vrai. Plus le diamètre de l'objectif est important, plus il collectera de lumière et plus l'image observée sera lumineuse.

19 **1.** Par définition : $\overline{G} = \dfrac{\theta'}{\theta}$.

2. Dans les triangles $O_1A_1B_1$ et $O_2A_1B_1$, rectangles en A_1, on peut écrire respectivement :

$$\tan(\theta) \approx \theta = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1} \text{ et } \tan(\theta') \approx \theta' = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2}$$

Soit $\overline{G} = \dfrac{\theta'}{\theta} = -\dfrac{f'_1}{f'_2}$.

3. $\overline{G} = -\dfrac{f'_1}{f'_2} = -\dfrac{50{,}0}{1{,}0} = -50$.

20 **1.** L'ouverture correspond au diamètre de l'objectif, la longueur focale à la distance focale de l'objectif et les 3 oculaires sont caractérisés par leurs distances focales.

2. Par définition : $\overline{G} = -\dfrac{f'_1}{f'_2}$. Il y a donc 3 valeurs possibles de grossissement :

$-\dfrac{600}{20} = -30$; $-\dfrac{600}{12} = -50$; $-\dfrac{600}{4} = -150$.

21 *Une erreur de signe s'est glissée dans le spécimen du professeur. Le grossissement de la lunette doit être de – 40. Cette erreur a été rectifiée dans le manuel élève et dans les manuels numériques où, par ailleurs, les valeurs angulaires sont données en degré.*

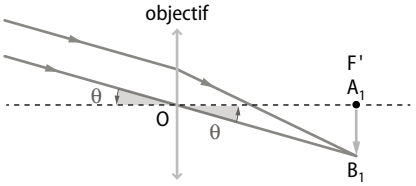
1. Comme $\overline{G} = \dfrac{\theta'}{\theta}$:

$\theta' = \overline{G} \cdot \theta = -40 \times 9{,}4 \times 10^{-3} = -0{,}38°$

2. $\overline{G_{min}} = \dfrac{\theta'_{min}}{\theta} = \dfrac{1{,}7 \times 10^{-2}}{-9{,}4 \times 10^{-3}} \approx -1{,}8$

22 **1.** 76 cm correspond au diamètre de l'objectif

2. a.



b. D'après le schéma :

$$A_1B_1 = f'_1 \cdot \tan\theta = 17{,}89 \times \tan\frac{1}{3\,600}$$
$$= 8{,}7 \times 10^{-5}\ \text{m} = 87\ \mu\text{m}.$$

3. Par définition : $\overline{G} = -\dfrac{f'_1}{f'_2}$ donc $f'_2 = -\dfrac{f'_1}{\overline{G}}$.

Le grossissement de –1 800 est obtenu avec un oculaire de distance focale :

$$f'_2 = -\frac{17{,}89}{-1\,800} = 9{,}9\ \text{mm}$$

et celui de –2 200 avec une distance focale de :

$$f'_2 = -\frac{17{,}89}{-2\,200} = 8{,}1\ \text{mm}$$

Faire le point avant d'aller plus loin p. 466

◗ ***Quels sont les critères de choix d'une lunette commerciale ?***

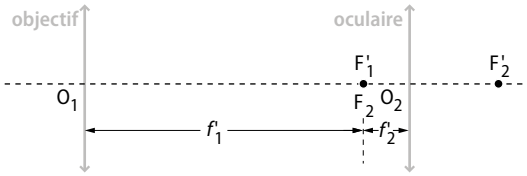
Le grossissement n'est pas la seule caractéristique à prendre en compte lors du choix d'une lunette astronomique. L'observateur doit adapter cette grandeur en fonction de la luminosité de l'astre étudié.

En effet, lorsque le grossissement augmente, la luminosité de l'image d'un objet étendu diminue. Ce n'est pas le cas lorsqu'on observe un objet ponctuel comme une étoile. C'est pour cette raison qu'une lunette est généralement équipée d'un objectif et de plusieurs oculaires qui permettent de faire varier le grossissement.

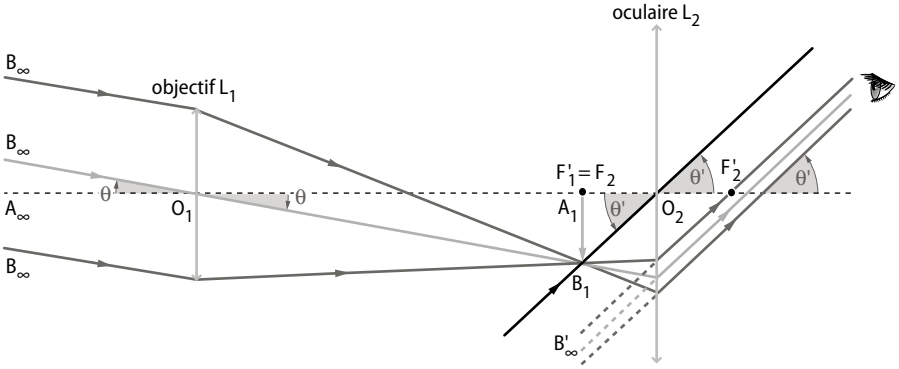
La taille de l'objectif est également un critère de choix important : plus le diamètre sera grand, plus l'image observée sera lumineuse.

◗ ***Modéliser une lunette astronomique afocale en situant les foyers des lentilles qui la constituent***.

Une lunette afocale est constituée de deux lentilles convergentes : un objectif et un oculaire espacés d'une distance égale à la somme de leurs distances focales. La distance focale de l'objectif doit être plus grande que celle de l'oculaire.



◗ ***Construire le faisceau émergent issu d'un point objet situé à l'« infini » après avoir traversé une lunette afocale.***



◗ ***Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale en fonction des distances de l'oculaire et de l'objectif.***

Par définition : $\overline{G} = \dfrac{\theta'}{\theta}$.

En appliquant les relations trigonométriques dans les triangles $O_1A_1B_1$ et $O_2A_1B_1$, on montre que : $\overline{G} = -\dfrac{f'_1}{f'_2}$.

◗ ***Expliquer pourquoi le foyer image de l'objectif d'une lunette afocale est confondu avec le foyer objet de l'oculaire.***

Une lunette afocale donne d'un objet à l'infini une image intermédiaire dans le plan focal image de l'objectif. Cette image intermédiaire donne par l'oculaire une image définitive à l'infini : l'image intermédiaire doit donc se situer dans le plan focal objet de l'oculaire. Le foyer image de l'objectif doit donc être confondu avec le foyer objet de l'oculaire.

◗ ***Que signifie qu'une lunette afocale a un grossissement égal à 20 ?***

Une lunette afocale qui a un grossissement égal à 20 grossit 20 fois. Elle permet d'observer un astre comme s'il était placé à une distance 20 fois moins grande.

◗ ***Écrire la relation qui permet de calculer le grossissement d'un instrument d'optique en explicitant chaque grandeur et son unité.***

En fonction des données dont on dispose, on peut utiliser les deux relations du grossissement :

grossissement (sans unité) $\overline{G} = \dfrac{\theta'}{\theta}$ — θ' : angle sous lequel l'image définitive A'B' est vue à travers la lunette ; θ : angle sous lequel l'objet AB est vu à l'œil nu

ou

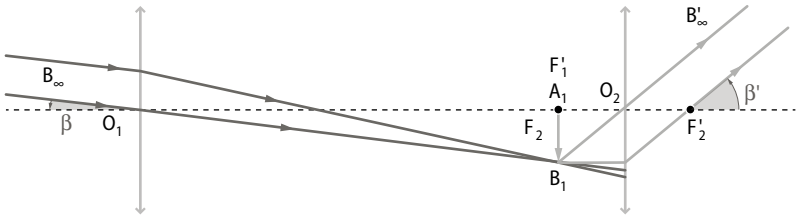
grossissement (sans unité) $\overline{G} = -\dfrac{f'_1}{f'_2}$ — f'_1 : distance focale de l'objectif ; f'_2 : distance focale de l'oculaire

Les angles et les distances focales doivent être exprimés dans la même unité.

Exercice similaire à l'exercice résolu

p. 467

24 **1. a.**



b. L'objectif donne de l'objet à l'infini une image intermédiaire située au foyer image de l'objectif : il faudrait donc placer l'écran à 30,0 cm de l'objectif.

2. a. Voir schéma ci-dessus.

b. Par définition, le grossissement de la lunette est le rapport : $\overline{G} = \dfrac{\beta'}{\beta}$.

Dans les triangles rectangles $O_1A_1B_1$ et $O_2A_1B_1$, rectangles en A_1, on peut écrire respectivement :

$$\tan\beta \approx \beta = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1} \text{ et } \tan\beta' \approx \beta' = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2}$$

Soit : $\overline{G} = \dfrac{\beta'}{\beta} = -\dfrac{f'_1}{f'_2}$.

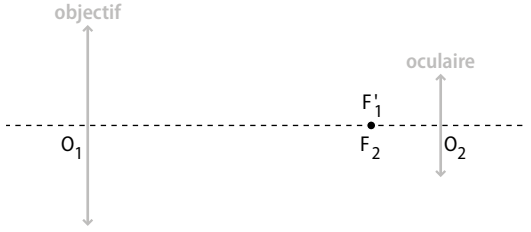
3. Le grossissement de la lunette utilisée vaut $\overline{G} = -\dfrac{300}{50} = -6$: le message ne sera pas suffisamment grossi pour être déchiffré.

S'entraîner pour maîtriser

p. 468

25 **1.** La distance focale de l'objectif est toujours plus grande que celle de l'oculaire, donc l'objectif est à une distance focale $f'_1 = 30$ cm = 300 mm et l'oculaire une distance focale $f'_2 = 50$ mm.

2. a. Pour une lunette afocale, le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire.



b. La distance qui sépare les deux lentilles doit être égale à $f'_1 + f'_2$ soit 35 cm.

3. Le grossissement d'une lunette afocale se calcule à partir des distances focales :

$$G = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{500}{30} \approx -17$$

26 **1.** Les lentilles convergentes sont convexes car les bords extérieurs sont plus fins que le centre.

2. L'image observée par Kepler est renversée par rapport à l'objet, alors que celle observée par Galilée est dans le même sens que l'objet.

3. a. Lorsqu'un faisceau de lumière blanche change de milieu, toutes les couleurs ne sont pas réfractées de la même façon : les radiations violettes sont plus déviées que les radiations rouges car l'indice de réfraction du verre dépend de la longueur d'onde : c'est le phénomène de dispersion.

b. Plus l'épaisseur de verre traversée sera importante, plus la dispersion des rayons émergents de la lentille sera grande : il faut donc diminuer l'épaisseur de verre traversé pour limiter les aberrations.

c. L'épaisseur de verre traversée est reliée à la courbure des lentilles : pour diminuer la courbure d'une lentille, il faut qu'elle soit plus grande.

27 ***La grande tache rouge de Jupiter***

En observant Jupiter avec un télescope, on peut remarquer une grande tache rouge, qui correspond à une gigantesque zone de hautes pressions de l'atmosphère de la planète.

Donnée : le pouvoir séparateur de l'œil est estimé à une minute d'arc (1' = 1/60°).

1. *Calculer le diamètre apparent de Jupiter quand cette planète, d'un diamètre de 1,4 × 10^5 km, est à 6,3 × 10^8 km de la Terre.*
2. *Lequel des oculaires de distances focales respectives 10 mm, 20 mm et 25 mm faut-il utiliser pour obtenir le meilleur grossissement ?*
3. *Calculer alors le diamètre apparent de Jupiter à travers le télescope, dont l'objectif a une distance focale de 600 mm.*
4. *La grande tache rouge, qui mesure environ 1/6 du diamètre de la planète, sera-t-elle visible avec ce télescope ?*

1. Le diamètre apparent d'une planète est défini par l'angle θ tel que :

$$\theta \approx \tan(\theta) = \frac{d}{D}$$

$$= \frac{1{,}4 \times 10^5}{6{,}3 \times 10^8} \approx 2{,}2 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 0{,}013° \approx 46'' \text{ d'angle.}$$

2. Comme $\overline{G} = -\frac{f'_1}{f'_2}$, la plus grande valeur de grossissement est obtenue pour la plus petite valeur de f'_2. Il faut donc utiliser l'oculaire de distance focale 10 mm pour obtenir le meilleur grossissement.

3. Avec l'oculaire de 10 mm, $G = -\frac{600}{10} = -60$ et :

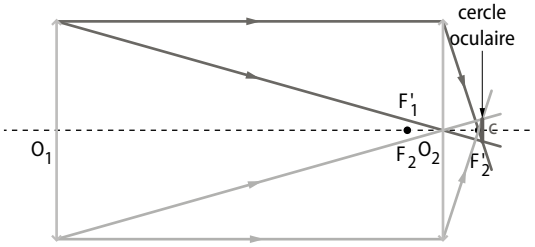
$\theta' = \overline{G} \cdot \theta = -60 \times 46'' = -46'$

(ou, en degré : $\theta' = -60 \times 0{,}013° = -0{,}78°$).

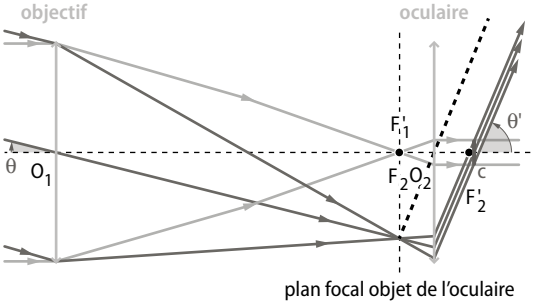
4. Le diamètre apparent de la grande tache rouge à travers cette lunette vaudra −46/6 soit −7,6' (−0,13°). La grande tache rouge sera donc visible.

28 **1. a.** Avec une échelle 1/10 le long de l'axe optique, la distance $O_1O_2 = 110$ cm mesurera $\frac{110}{10}$ soit 11 cm sur le schéma ci-dessous.
Avec une échelle 1/1 dans la direction perpendiculaire à l'axe optique, le diamètre des lentilles mesurera 4 cm sur le schéma ci-dessous.

b. Pour construire l'image de l'objectif à travers l'oculaire, on cherche le point d'intersection après passage à travers l'oculaire de deux rayons particuliers (en gris foncé sur le schéma ci-après) issus de l'extrémité supérieure de l'objectif :
– le rayon qui passe par O_2 et qui n'est pas dévié ;
– le rayon qui arrive parallèle à l'axe optique et qui est dévié en passant par le foyer image F'_2.
Le point d'intersection correspond à une extrémité du cercle oculaire.
On procède de la même manière à partir de l'extrémité inférieure de l'objectif (tracés en gris clair).
La position du cercle oculaire sur l'axe optique est notée C.



2.



plan focal objet de l'oculaire

a. Un rayon lumineux parallèle à l'axe optique qui traverse l'objectif en émerge en passant par le foyer image F'_1 qui coïncide avec le foyer objet F_2 : il traverse donc l'oculaire et ressort parallèlement à l'axe optique (tracé gris clair).
b. Un rayon lumineux incliné d'un angle θ par rapport à l'axe optique et qui passe par le centre optique O_1 de l'objectif n'est pas dévié, il se propage en ligne droite jusqu'à l'oculaire. Les rayons parallèles à ce dernier qui pénètrent dans l'objectif se croisent en un même point du plan focal image (plan perpendiculaire à l'axe optique passant par le foyer image F'_1) qui est aussi le plan focal objet de l'oculaire : tous ces rayons émergent parallèles entre eux à la sortie de l'oculaire (tracés gris foncé).
c. Toute la lumière qui rentre par l'objectif de la lunette ressort par le cercle oculaire. C'est donc au niveau du cercle oculaire qu'il faut placer l'œil pour recevoir un maximum de lumière en provenance de l'objet à l'infini.

3. On applique la relation de conjugaison à l'oculaire pour déterminer la position du cercle oculaire :

$$\frac{1}{\overline{O_2C}} = \frac{1}{\overline{O_2O_1}} + \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{-110} + \frac{1}{10} \approx 0{,}091 \text{ cm}^{-1},$$

soit $\overline{O_2C} = 11$ cm.

Le cercle oculaire se situe à 11 cm de l'oculaire. On applique la relation de grandissement à l'oculaire pour déterminer le diamètre du cercle oculaire :

$$d_{CO} = \left|\overline{\gamma} \cdot d_{\text{objectif}}\right| = \left|\frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_2O_1}} \cdot d_{\text{objectif}}\right|$$

$$= \left|\frac{11}{-110} \times 4{,}0\right| = 0{,}40 \text{ cm} = 4{,}0 \text{ mm}$$

Le cercle oculaire mesure 4,0 mm de diamètre.

29 **1. a.** On applique la relation de conjugaison à l'oculaire pour déterminer la position du cercle oculaire :

$$\frac{1}{\overline{O_2C}} = \frac{1}{\overline{O_2O_1}} + \frac{1}{f_2'} = \frac{1}{-912{,}5} + \frac{1}{12{,}5} \approx 0{,}0789 \text{ mm}^{-1}$$

Soit $\overline{O_2C} = 12{,}7$ mm. Le cercle oculaire se situe à 12,7 mm de l'oculaire

b. On applique la relation de grandissement à l'oculaire pour déterminer le diamètre du cercle oculaire :

$$d = \left|\overline{\gamma} \cdot D\right| = \left|\frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_2O_1}} \cdot D\right| = \left|\frac{12{,}7}{-912{,}5} \times 60\right| = 0{,}84 \text{ mm}$$

Le diamètre du cercle oculaire mesure 0,84 mm.

2. En notant F_C le facteur de concentration, P_S la puissance lumineuse surfacique, S la surface et R le rayon, on a :

$$F_C = \frac{P_S(\text{cercle oculaire})}{P_S(\text{objectif})} = \frac{\dfrac{P}{S_{\text{cercle oculaire}}}}{\dfrac{P}{S_{\text{objectif}}}} = \frac{S_{\text{objectif}}}{S_{\text{cercle oculaire}}}$$

$$= \frac{\pi \cdot R^2_{\text{objectif}}}{\pi \cdot R^2_{\text{cercle oculaire}}} = \frac{R^2_{\text{objectif}}}{R^2_{\text{cercle oculaire}}}$$

$$= \frac{30^2}{0{,}42^2} \approx 5{,}1 \times 10^3$$

3. Le diamètre de la pupille de l'œil étant supérieur au diamètre du cercle oculaire, toute la lumière qui est entrée dans la lunette pénètre dans l'œil avec une puissance surfacique 5 000 fois plus grande que la lumière qui nous arrive directement du Soleil. Il est donc très dangereux pour l'œil d'observer directement le Soleil à travers une lunette.

30 **1.** Avec une lunette afocale, l'image intermédiaire se forme dans le plan focal image de l'objectif, qui coïncide alors avec le plan focal objet de l'oculaire. Pour que l'image définitive se forme non plus à l'infini mais sur un écran, il faut que l'image intermédiaire se forme avant le plan focal objet de l'oculaire : il convient donc d'éloigner l'oculaire de l'objectif.

2. Pour que l'image définitive se forme à une distance $\overline{O_2A'} = 30$ cm de l'oculaire, il faut déplacer l'oculaire d'une distance d telle que $\overline{O_2A_1} = -(f_2' + d)$.

On applique la relation de conjugaison à l'oculaire :

$$\frac{1}{\overline{O_2A_1}} = \frac{1}{\overline{O_2A'}} - \frac{1}{f_2'}$$

soit $\dfrac{1}{\overline{O_2A_1}} = \dfrac{1}{30} - \dfrac{1}{1{,}25} \approx -0{,}77 \text{ cm}^{-1}$

Soit $\overline{O_2A_1} = -1{,}3$ cm.

et $d = -f_2' - \overline{O_2A_1} = -1{,}25 + 1{,}3 = 0{,}05$ cm $= 0{,}5$ mm.

Il faut donc éloigner l'oculaire de 0,5 mm.

3. La taille de l'image intermédiaire donnée par l'objectif vaut :

$$\overline{A_1B_1} = -f_1' \cdot \tan\theta = -900 \times \tan(9{,}3 \times 10^{-3})$$
$$= -8{,}4 \text{ mm}$$

Elle se situe à une distance $\overline{O_2A_1} = -1{,}3$ cm de l'oculaire.

La taille de l'image projetée sur l'écran s'obtient en appliquant les relations de grandissement à l'oculaire :

$$\overline{A'B'} = \overline{\gamma_{\text{oculaire}}} \cdot \overline{A_1B_1} = \frac{\overline{O_2A'}}{\overline{O_2A_1}} \cdot \overline{A_1B_1}$$

$$= \frac{30}{-1{,}3} \times -0{,}84 = 19 \text{ cm}$$

4. Les proportions étant conservées entre l'objet et l'image définitive :

$$\frac{d'_{\text{tache solaire}}}{d_{\text{tache solaire}}} = \frac{D'_{\text{Soleil}}}{D_{\text{Soleil}}}$$

Soit $d_{\text{tache solaire}} = \dfrac{D_{\text{Soleil}}}{D'_{\text{Soleil}}} \cdot d'_{\text{tache solaire}}$

$$= \frac{1{,}39 \times 10^6}{19} \times 0{,}61 = 4{,}5 \times 10^4 \text{ km}$$

31 **1.** L'image donnée par la lunette afocale se forme à l'infini. L'œil myope ne pourra pas en donner une image sur la rétine. il faudra donc déplacer l'oculaire.

2. a. Pour une observation optimale, l'œil myope sera placé au niveau du cercle oculaire ; l'image A'B' donnée par la lunette devra être située à 50 cm du cercle oculaire soit :

$\overline{F_2'A'} = -50$ cm et $\overline{O_2A'} = -40$ cm

On applique la relation de conjugaison à l'oculaire pour déterminer la position de l'image intermédiaire :

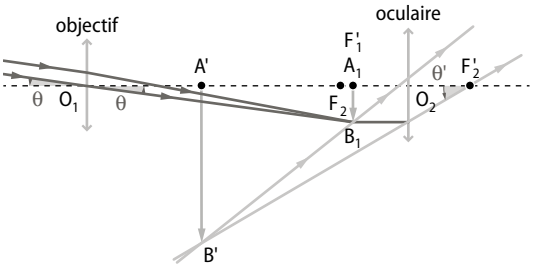
$$\frac{1}{\overline{O_2A_1}} = \frac{1}{\overline{O_2A'}} - \frac{1}{f_2'}$$

soit $\dfrac{1}{\overline{O_2A_1}} = \dfrac{1}{-40} - \dfrac{1}{10} = -0{,}125 \text{ cm}^{-1}$

soit $\overline{O_2A_1} = -8{,}0$ cm.

L'image intermédiaire A_1B_1 se forme sur le foyer image F_1' et à 8,0 cm avant l'oculaire (10 cm pour un œil normal). Il faut donc rapprocher l'oculaire de l'objectif de 2,0 cm.

b.



3. a. La taille de l'image intermédiaire donnée par l'objectif vaut :

$\overline{A_1B_1} = -f'_1 \cdot \tan\theta = -60 \times \tan(2{,}0 \times 10^{-2}) = -1{,}2$ cm

b. La taille de l'image définitive s'obtient en appliquant les relations de grandissement à l'oculaire :

$$\overline{A'B'} = \overline{\gamma_{oculaire}} \cdot \overline{A_1B_1} = \frac{\overline{O_2A'}}{\overline{O_2A_1}} \cdot \overline{A_1B_1}$$

$$= \frac{-40}{-8} \times -1{,}2 = -6{,}0 \text{ cm}$$

$$\tan\theta' \approx \theta' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{F'_2A'}} = \frac{-6{,}0}{-50} \approx 0{,}12 \text{ rad}$$

4. a. Le grossissement de la lunette ainsi réglée vaut :

$$\overline{G} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{0{,}12}{-2{,}0 \times 10^{-2}} \approx -6$$

b. Pour la lunette afocale :

$$\overline{G} = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{60}{10} = -6$$

32 › Démarche experte

L'astronome sera perturbé par l'éraflure si les images respectives de l'éraflure et de l'étoile observée se forment dans le même plan. Ces deux objets étant dans des plans différents (étoile à l'infini et éraflure sur le plan de l'objectif), leurs images à travers la lunette se formeront dans des plans différents.

› Démarche avancée

1. On applique la relation de conjugaison à l'objectif pour déterminer la position de l'image intermédiaire de l'éraflure :

$$\frac{1}{\overline{O_1A_1}} = \frac{1}{\overline{O_1A}} + \frac{1}{f'_1} = \frac{1}{-10} + \frac{1}{800} = -0{,}099 \text{ cm}^{-1}$$

Soit $\overline{O_1A_1} = -10$ cm. L'image intermédiaire est virtuelle pour l'objectif.

On applique la relation de conjugaison à l'oculaire pour déterminer la position de l'image finale :

$$\frac{1}{\overline{O_2A'}} = \frac{1}{\overline{O_2A_1}} + \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{-811} + \frac{1}{1} = 1{,}0$$

Soit $\overline{O_2A'} = 1{,}0$ cm. L'image définitive se forme dans le plan focal image de l'oculaire.

2. La lunette étant afocale, l'image de l'étoile se forme à l'infini.

3. Les images respectives de l'étoile et de l'éraflure ne se forment pas dans le même plan. L'astronome ne peut pas observer simultanément ces deux images dans l'oculaire.

33 **1.** Pour que l'image définitive se forme à l'infini, il faut placer l'oculaire de telle manière que l'image intermédiaire A_1B_1 se forme dans le plan focal objet de l'oculaire. La distance entre l'objectif et l'oculaire vaut alors $O_1O_2 = f'_1 + f'_2 = 24$ cm.

2. a. Pour la lunette afocale : $\overline{G} = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{20}{4{,}0} = -5$.

b. La distance de visée étant la même dans les deux cas : $\frac{\theta'}{\theta} = \frac{h'}{h}$. Sur le schéma, on retrouve bien $\frac{h'}{h} \approx 5$ et l'image observée à travers la lunette est à l'envers.

Une erreur s'est glissée sur le spécimen du professeur : la fenêtre sur le schéma de droite doit être renversée et sa hauteur doit être 5 fois supérieure à celle sur le schéma de gauche. Cette erreur a été corrigée sur le manuel de l'élève et les manuels numériques.

3. a. 14 divisions du micromètre représentent une longueur de 13×100 µm, soit une image intermédiaire de hauteur $A_1B_1 = 1{,}3$ mm.

b. La distance qui sépare l'immeuble du lieu d'observation s'obtient en appliquant les relations de grandissement à l'objectif :

$\overline{\gamma_{objectif}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}}$, soit :

$$\overline{O_1A} = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{A_1B_1}} \cdot \overline{AB} = \frac{20}{0{,}13} \times 15 \approx 2{,}3 \times 10^3 \text{ m} \approx 2{,}3 \text{ km}$$

34 **1.** Le faisceau lumineux qui émerge de la lunette est concentré à la sortie de l'oculaire. Le faisceau qui pénètre dans l'œil de l'observateur est beaucoup plus intense que sans lunette. Plus le diamètre de l'objectif est grand, plus il collecte de lumière.

2. a. En appliquant le théorème de Thalès dans les triangles opposés par le sommet $F'_1 = F_2$, il vient :

$\frac{f'_1}{D} = \frac{f'_2}{a}$ soit : $\overline{G} = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{D}{a}$.

b. Pour que toute la lumière en provenance de l'astre observé pénètre dans l'œil après la traversée de la lunette, il faut que $a = 6$ mm soit :

$\overline{G} = -\frac{90}{6} = -15$

c. Par définition : $\overline{G} = -\dfrac{f_1'}{f_2'}$ soit :

$f_2' = -\dfrac{f_1'}{\overline{G}} = \dfrac{60}{15} = 4{,}0$ cm

35 Exemple d'exposé oral

Pour modéliser une lunette afocale sur le banc d'optique, il faut utiliser deux lentilles convergentes de distances focales différentes. Celle qui a la plus grande distance focale jouera le rôle de l'**objectif** est sera placée face à l'objet éloigné à observer. L'autre jouera le rôle de l'**oculaire**. La distance entre les deux lentilles doit être égale à la somme de leurs distances focales. L'œil de l'observateur sera placé du côté de l'oculaire à l'endroit, appelé **cercle oculaire**, où il y a un maximum de lumière. Le diamètre du cercle oculaire est inversement proportionnel à la valeur du **grossissement**. Il faut donc trouver un compromis pour que l'image observée soit à la fois grossie et suffisamment lumineuse. Le pouvoir grossissant de la lunette n'est pas le seul critère à prendre en compte, il ne faut pas négliger son rôle de **collecteur de lumière**.

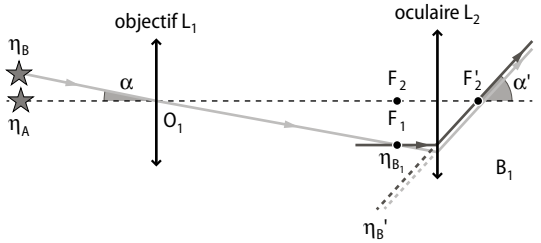
36 Exemple d'exposé oral

Une lunette astronomique est un instrument d'optique constitué de deux lentilles convergentes : un objectif et un oculaire, espacés d'une distance égale à la somme de leurs distances focales. La distance focale de l'objectif doit être plus grande que celle de l'oculaire. On l'utilise pour observer des astres éloignés, comme des étoiles ou des planètes dont on veut étudier la surface. À travers la lunette, on voit l'astre comme s'il était situé à une distance plus petite que la distance réelle. Le grossissement de la lunette est égal au rapport de la distance focale de l'objectif par la distance focale de l'oculaire.

Développer ses compétences p. 471

37 › Questions préliminaires

1. L'image η_{B1} donnée de l'étoile η_B par l'objectif se forme dans le plan focal image de l'objectif qui coïncide, dans le cas d'une lunette afocale, avec le plan focal objet de l'oculaire. L'image définitive η_B' est envoyée à l'infini par l'oculaire dans la direction formant un angle α' avec l'axe optique.



2. $\overline{G} = \dfrac{\alpha'}{\alpha} = -\dfrac{f'_{\text{objectif}}}{f'_{\text{oculaire}}}$

› Problématique

$\overline{G} = -\dfrac{6{,}80}{4{,}0 \times 10^{-2}} = -170$

La lunette de l'observatoire du Harvard College a un grossissement de −170. L'écart angulaire de l'étoile double η Ori, observée à travers la lunette, vaut donc $170 \times 1{,}4 = 238$ secondes d'arc, soit :

$\dfrac{238}{3\,600} \times \dfrac{\pi}{180} \approx 1{,}2 \times 10^{-3}$ rad.

Le pouvoir séparateur d'un œil normal valant 3×10^{-4} rad, les deux composantes η_A et η_B sont séparées lorsqu'on observe η Ori à travers cette lunette.

38 › Questions préliminaires

1. À l'apogée de sa trajectoire, la Lune, de diamètre $d = 3\,474$ km, se situe à une distance $D = 406\,700$ km de la Terre. Son diamètre apparent vaut donc :

$\alpha_A = \dfrac{d}{D} = \dfrac{3\,474}{406\,700} \approx 8{,}542 \times 10^{-3}$ rad

2. a. Après la traversée de la lunette, le diamètre apparent vaut $\alpha'_A = G \cdot \alpha_A \approx 0{,}43$ rad avec l'oculaire de distance focale 33 mm, qui correspond à la plus petite valeur de grossissement ($G = \dfrac{1\,650}{33} = 50$). L'image à l'infini obtenue joue le rôle d'objet pour l'objectif de l'appareil photo qui en donne une image sur le capteur de diamètre :

$d' = f'_{\text{APN}} \cdot \tan(\alpha'_A) = 135 \times \tan(0{,}43) = 62$ mm.

b. La taille du capteur (22,3 mm × 14,9 mm) ne permet pas d'observer l'image complète de la Lune. Les autres oculaires, de distances focales plus petites, ne le permettront pas non plus car la valeur du grossissement sera encore plus élevée.

3. a. La taille de l'image intermédiaire donnée de la Lune par l'objectif de la lunette se calcule avec la relation : $A_1B_1 = f'_{\text{objectif}} \cdot \tan(\alpha)$.

À l'apogée : $A_1B_1 = 1\,650 \times \tan\left(\dfrac{3\,474}{406\,700}\right) = 14$ mm

Au périgée : $A_1B_1 = 1\,650 \times \tan\left(\dfrac{3\,474}{356\,500}\right) = 16$ mm

L'image intermédiaire mesure environ 14 mm lorsque la Lune est à l'apogée et 16 mm lorsqu'elle est au périgée.

b. En plaçant le capteur de l'appareil photo au foyer image de l'objectif, on peut observer l'image complète de la Lune lorsqu'elle se trouve à l'apogée.

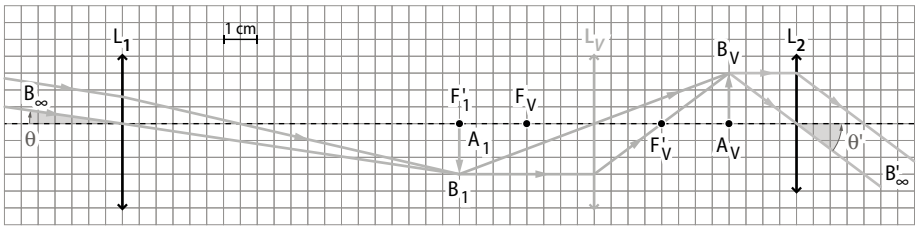
› Problématique

Lorsqu'on réalise des clichés de la Lune à l'aide d'une lunette astronomique et d'un appareil photographique numérique, plusieurs facteurs sont à prendre en compte en fonction de l'observation souhaitée : il n'est pas possible de photographier la Lune dans son entier tout en ayant accès aux détails de sa surface.

Si l'on souhaite, par exemple, photographier un cratère sur le sol lunaire, il est intéressant d'utiliser un oculaire permettant une valeur élevée du grossissement (pas trop tout de même car, en augmentant la valeur du grossissement, on affaiblit la luminosité de l'image d'un objet étendu comme la Lune : ce n'est pas le cas lorsqu'on observe une étoile pour laquelle la lunette joue le rôle de collecteur de lumière).

En revanche, les dimensions du capteur de l'appareil photographique utilisé limitent la taille de l'image obtenue. Dans ce cas, on enlève l'oculaire et on fixe directement le boîtier de l'appareil photo sur l'objectif de la lunette de manière à ce que le capteur soit localisé dans le plan focal image de l'objectif de la lunette.

39 **1.**, **2.a.** et **c.**



2. b. On vérifie graphiquement que l'image A_VB_V est renversée par rapport A_1B_1 ($\overline{\gamma} < 0$) et de même taille : $\left|\overline{\gamma}\right| = 1$.

3. L'ajout du véhicule permet d'observer une image à l'endroit.

4. a. D'après le schéma :

$$\tan(\theta) \approx \theta = \frac{\overline{A_1B_1}}{f_1'} \text{ et } \tan(\theta') \approx \theta' = \frac{\overline{A_VB_V}}{-f_2'} = \frac{-\overline{A_1B_1}}{-f_2'}$$

Soit : $\overline{G} = \dfrac{\theta'}{\theta} = \dfrac{f_1'}{f_2'} = \dfrac{10}{2{,}0} = 5.$

La présence du véhicule ne modifie pas la valeur du grossissement mais son signe.

b. En appliquant l'approximation des petits angles $\left(\tan\left(\dfrac{\theta}{2}\right) \approx \dfrac{\theta}{2} = \dfrac{h/2}{D}\right)$, il vient :

$$\theta' = \overline{G} \cdot \theta = \overline{G} \cdot \frac{h}{D} = 5 \times \frac{210}{6\,000} \approx 0{,}18 \text{ rad} \approx 10°$$

40 **1. a.** Le réticule doit se situer dans le plan focal objet de l'oculaire, donc à 1,0 cm de l'oculaire.

b. La lunette doit être afocale :

$O_1O_2 = f_1' + f_2' = 13$ cm.

c. L'image intermédiaire donnée par l'objectif d'un objet situé à distance finie se forme derrière le foyer image F_1'. Pour que l'image définitive se forme à l'infini, il faut que l'image intermédiaire se situe dans le plan focal objet de l'oculaire : il faut donc éloigner l'oculaire de l'objectif.

2. a. Pour une observation sans fatigue, l'image intermédiaire A_1B_1 doit se former dans le plan focal objet de l'oculaire, donc :

$\overline{O_1A_1} = \overline{O_1O_2} + \overline{O_2A_1} = \overline{O_1O_2} - f_2' = 18 - 1 = 17$ cm.

On applique la relation de conjugaison à l'objectif pour déterminer la position de l'objet :

$$\frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{\overline{O_1A_1}} - \frac{1}{f_1'} = \frac{1}{17} - \frac{1}{12} = -0{,}0245 \text{ cm}^{-1}$$

Soit $\overline{O_1A} = -41$ cm.

b. Cette distance n'est pas modifiée pour un œil myope. L'observateur adaptera le réglage de l'oculaire à sa vue.

c. La lunette ainsi réglée permet d'observer des objets situés à la distance fixe de 41 cm, d'où son nom.

3. a. La distance entre l'objet et le viseur correspond à la distance de visée soit 41 cm.

b. $\overline{OA} = x_A - x_O = 41 - 51 = -10$ cm

$\overline{OA'} = x_{A'} - x_O = 44{,}3 - 51 = -6{,}7$ cm

c. La relation de conjugaison appliquée à la lentille convergente permet d'en déduire sa distance focale :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{-6{,}7} - \frac{1}{-10} = -0{,}049 \text{ cm}^{-1}$$

Soit $f' = -20$ cm.

POUR PRÉPARER L'ECE *p. 474*

1. Proposition de protocole expérimental

1. L'image donnée par une lentille convergente d'un objet à l'infini se forme dans le plan focal image :

• Positionner « l'objet à l'infini », la lentille dont on souhaite déterminer la distance focale et un écran sur le banc d'optique.

• Rechercher la position de l'image nette.

• Mesurer la distance lentille-écran, qui correspond à la distance focale de la lentille.

2. La mesure de distance étant réalisée sur le banc gradué en mm, l'incertitude-type sur la mesure peut être évaluée à 0,5 mm.

3. Le foyer image F'_{ob} de l'objectif et le foyer objet F_{oc} de l'oculaire coïncident tous les deux avec le point image A_1.

4. La distance qui sépare les deux lentilles est alors égale à $f'_1 + f'_2$.

2. Mise en œuvre du protocole expérimental proposé

1. L'objectif ayant une distance focale supérieure à celle de l'oculaire, $f'_{ob} = 33$ cm et $f'_{oc} = 5$ cm.

2. Pour que la lunette modélisée soit afocale, la distance qui sépare l'objectif de l'oculaire doit valoir 38 cm.

3. D'après le schéma : $\tan(\alpha') = \dfrac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_cA_1}} = \dfrac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2}$

L'image intermédiaire mesure $\overline{A_1B_1} = -1{,}7$ cm, donc $\alpha' \approx 0{,}33$ rad.

3. Exploitation du résultat obtenu

Cette lunette a un grossissement :

$$\overline{G} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{0{,}33}{-0{,}050} = -6{,}6.$$

Deux étoiles séparées d'une distance angulaire de 0,5 minute d'angle seraient observées à travers cette lunette avec une distance angulaire de $0{,}5 \times 6{,}6 = 3{,}3'$, soit une valeur supérieure au pouvoir séparateur de l'œil : elles pourraient donc être distinguées.

CHAPITRE 19

Description de la lumière par un flux de photons

Manuel p. 476

LE PROGRAMME

2. Former des images, décrire la lumière par un flux de photons

B) Décrire la lumière par un flux de photons

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Le photon : énergie, vitesse, masse. Effet photoélectrique. Travail d'extraction.	Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique. Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière. Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence. Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
Absorption et émission de photons. Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.	Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.). *Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.*

Conformément au BO spécial n° 2 du 13 février 2020, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite du baccalauréat à la date de publication du manuel.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 476

SITUATION 1

Il s'agit de revenir ici sur les deux modèles de description de la lumière, vus en enseignement de spécialité de 1re : le modèle ondulatoire et le modèle particulaire.

› Exemple de réponse attendue

La lumière est une onde électromagnétique et un transport de particules, appelées photons.

› En classe de Terminale

Dans une approche spiralaire de l'enseignement de la physique-chimie, les élèves étudient dans l'**activité 1** une preuve expérimentale de l'aspect particulaire de la lumière : l'effet photoélectrique. Ils étudient les dispositifs qui en découlent dans l'**activité 2.**

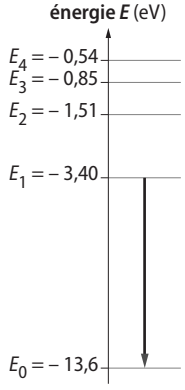
SITUATION 2

Cette situation revient sur les diagrammes d'énergies de l'atome, étudiés en enseignement de spécialité de 1re pour expliquer les spectres d'émission et d'absorption.

› Exemple de réponse attendue

Sur le diagramme ci-dessous, l'énergie du photon émis est de :

$|-13{,}6-(-3{,}40)|=10{,}2$ eV



L'émission d'un photon est représentée sur le diagramme par une flèche vers le bas.

› En classe de Terminale

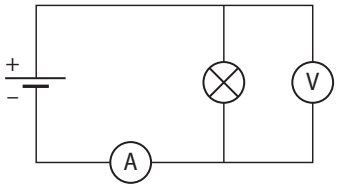
Les diagrammes d'énergie sont une conséquence de la quantification de l'énergie des atomes. L'émission et l'absorption de lumière sont exploitées dans de nombreux dispositifs qui utilisent l'interaction lumière-matière. Certains de ces dispositifs sont étudiés dans l'**activité 2**.

SITUATION 3

En classe de 2de, les élèves ont utilisé l'ampèremètre et le voltmètre pour tracer la caractéristique de dipôles.

› Exemple de réponse attendue

Pour mesurer la puissance électrique consommée, on doit brancher un voltmètre en dérivation et un ampèremètre en série et calculer le produit $P = U \cdot I$. On peut mesurer l'éclairement avec un luxmètre.



› En classe de Terminale

L'utilisation de l'ampèremètre et du voltmètre pour déterminer la puissance électrique va permettre de déterminer expérimentalement le rendement d'une cellule photovoltaïque dans l'**activité 3**.

ACTIVITÉS

p. 478 **ACTIVITÉ 1**

Effet photoélectrique

Commentaires pédagogiques

Cette activité permet aux élèves de bien comprendre les propriétés de l'effet photoélectrique et son interprétation, qui a une importance historique car elle met en évidence l'aspect particulaire de la lumière. C'est donc l'occasion d'étudier l'histoire des sciences.

L'animation « Effet photoélectrique » permet de tester l'influence de la longueur d'onde et de l'intensité de la lumière sur l'émission d'électricité de plusieurs matériaux, parmi lesquels le sodium et le zinc. Elle est nécessaire pour répondre aux questions de l'activité. La vidéo « Expérience de l'effet photoélectrique » montre l'influence de la longueur d'onde sur l'effet photoélectrique du zinc.

› Exploitation et analyse

1. L'effet photoélectrique est l'extraction d'électrons d'un matériau par un rayonnement.

2. a. On constate, dans l'animation, que les électrons ne sont extraits qu'en dessous d'une certaine longueur d'onde, donc au-dessus d'une certaine fréquence (fréquence et longueur d'onde variant à l'inverse l'une de l'autre), quelle que soit l'intensité du rayonnement. Dans le doc. 1, on constate que les électrons sont extraits pour un rayonnement UV mais pas pour un rayonnement visible.

b. On mesure dans l'animation que, pour le zinc, la longueur d'onde seuil est $\lambda = 370$ nm et pour le sodium, $\lambda = 541$ nm.

La fréquence seuil du zinc est donc :

$$\nu_S = \frac{c}{\lambda_S} = \frac{3{,}00 \times 10^8}{370 \times 10^{-9}} = 8{,}11 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Celle du sodium est :

$$\nu_S = \frac{c}{\lambda_S} = \frac{3{,}00 \times 10^8}{541 \times 10^{-9}} = 5{,}55 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

c. Pour le zinc, l'effet photoélectrique a lieu pour $\lambda \leqslant 370$ nm, donc pour un rayonnement UV ($\lambda < 400$ nm), mais pas pour un rayonnement visible (400 nm $\leqslant \lambda \leqslant$ 800 nm).

3. Dans l'animation, on constate que plus l'intensité du rayonnement augmente, plus le nombre d'électrons émis augmente.

› Synthèse

Si l'on considère le modèle ondulatoire de la lumière, l'effet photoélectrique doit dépendre de l'intensité de la lumière et non de la fréquence. C'est donc le modèle particulaire de la lumière qui permet d'expliquer l'effet photoélectrique. En effet, si un photon possède une énergie supérieure à une énergie seuil qui dépend du matériau, un électron est arraché du matériau. Un photon de fréquence supérieure à la fréquence seuil suffit donc pour provoquer l'effet photoélectrique.

p. 479 **ACTIVITÉ 2**

Applications de l'interaction lumière-matière

Commentaires pédagogiques

Dans cette activité, les élèves découvrent les applications de l'effet photoélectrique et l'effet photovoltaïque. On pourra, à la question 4, attribuer un dispositif à un groupe d'élèves et demander de présenter le principe dans un petit exposé oral.

› Exploitation et analyse

1. a. L'effet photoélectrique extrait des électrons à la cathode. Ces électrons sont captés à l'anode, ce qui explique le courant électrique créé.

b. Les électrons quittent la cathode, elle a donc un signe négatif. Les électrons sont attirés par l'anode, qui a donc un signe positif.

2. $E \geqslant 1{,}12\ \text{eV} = E_{gap}$

Donc $\dfrac{h \cdot c}{\lambda} \geqslant E_{gap}$, donc $\lambda \leqslant \dfrac{h \cdot c}{E_{gap}}$.

AN : $\lambda \leqslant \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{1{,}12 \times 1{,}602 \times 10^{-19}} = 1{,}11\ \mu\text{m}.$

3. $E = \dfrac{h \cdot c}{\lambda}$

AN : $E = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{560 \times 10^{-9}}$

$= 3{,}55 \times 10^{-19}\ \text{J}.$

› Synthèse

a. A Diode électroluminescente : émission de photon par une jonction PN.

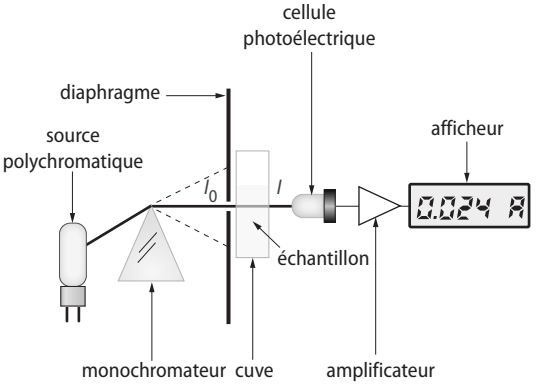
B Spectromètre et spectrophotomètre : effet photoélectrique.

C Détecteur de présence : effet photoélectrique.

D Panneau photovoltaïque : absorption de photon par une jonction PN.

b. A Une diode électroluminescente est constituée d'une jonction PN. Lorsqu'elle est reliée à une source de tension et branchée en sens direct, la recombinaison électron-trou provoque l'émission d'un photon.

B Un spectrophotomètre est utilisé pour mesurer l'absorbance dans le domaine du visible d'une solution colorée. Son principe simplifié est schématisé ci-dessous : une cellule photoélectrique convertit la lumière reçue en électricité. Cela lui permet de comparer l'intensité de la lumière incidente et l'intensité de la lumière transmise par la cuve contenant la solution en comparant les deux courants électriques correspondants et de calculer l'absorbance.



C Il existe différents types de capteur de présence : par réflexion de la lumière sur l'objet ou par extinction de la lumière en présence d'un objet. Dans le capteur de présence par réflexion, une cellule photoélectrique est disposée du même côté que la source de lumière. S'il y a un objet, la lumière est réfléchie en partie par l'objet et éclaire la cellule photoélectrique. Un courant est créé et déclenche, par exemple, une alarme.

D Les cellules photovoltaïques sont constituées de jonctions PN. L'apport d'énergie d'un photon va faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Il en résultera un courant électrique. La lumière est donc convertie en électricité.

p. 480 **ACTIVITÉ 3**

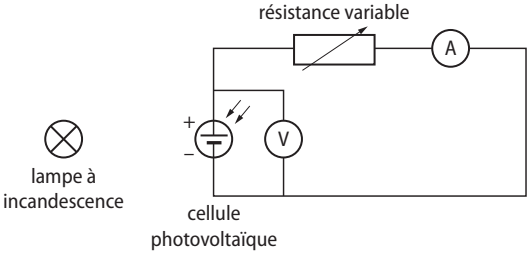
Rendement d'une cellule photovoltaïque

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

L'objectif de cette activité expérimentale est de déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque. Elle permet aux élèves de revoir l'utilisation d'un voltmètre, d'un ampèremètre et d'un tableur-grapheur. Le tracé de la caractéristique et la mesure de la puissance électrique maximale sont traités en enseignement scientifique de Terminale. On peut approfondir l'activité en étudiant l'influence de différents paramètres sur le rendement : inclinaison de la cellule, nombre de cellules, éclairement, etc.

› Exploitation et analyse

1. a.



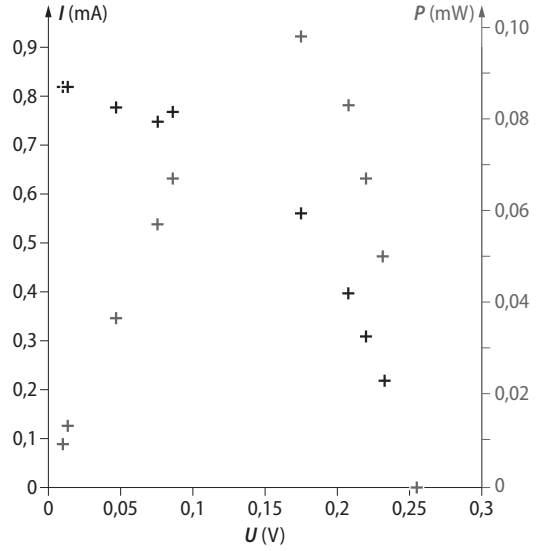
Exemple de mesures pour une cellule de surface $S = 0{,}0020\ \text{m}^2$ et un éclairement de 400 lx :

U (en V)	***I*** (en mA)	***P*** (en mW)
0,011	0,820	0,00902
0,016	0,820	0,01312
0,0470	0,780	0,03666
0,0760	0,750	0,0570
0,0860	0,770	0,06622
0,1750	0,560	0,0980
0,2080	0,400	0,0832
0,2200	0,310	0,0682
0,2320	0,220	0,05104
0,2560	0	0

b. Voir courbe ci-après pour les mesures ci-avant.

2. a. On calcule la puissance $P = U \cdot I$ (voir tableau ci-dessus).

b.



c. On lit $P_{\text{électrique}} = 0{,}0980$ mW.

3. a. $E = 400$ lx $= 4{,}00$ W $\cdot$ m^{-2}.

b. $P_{\text{lumineuse}} = E \cdot S$

AN : $P_{\text{lumineuse}} = 4{,}00 \times 0{,}0020 = 0{,}0080$ W
$= 8{,}0$ mW

› Conclusion

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

AN : $\eta = \dfrac{0{,}0980}{8{,}0} \times 100 = 1{,}2$ %

Ce résultat est faible, mais se situe dans l'ordre de grandeur de ce que l'on trouve avec le matériel des établissements scolaires. Le rendement dépend de l'éclairement, de l'inclinaison de la cellule, de sa température, etc.

On peut calculer l'incertitude sur le rendement :

$$u(\eta) = \eta \cdot \sqrt{\left(\frac{u(P_{\text{électrique}})}{P_{\text{électrique}}}\right)^2 + \left(\frac{u(E)}{E^2}\right)^2 + \left(\frac{u(S)}{S^2}\right)^2}$$

EXERCICES

Vérifier l'essentiel p. 485

1 La proposition A est une bonne réponse.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car l'aspect ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer l'effet photoélectrique. Avec l'aspect ondulatoire, il y aurait une intensité lumineuse seuil, par exemple.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'aspect ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer l'effet photoélectrique, donc ce n'est pas la dualité onde-particule qui permet d'expliquer l'effet photoélectrique.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car l'effet photoélectrique ne se produit qu'à partir d'une certaine fréquence.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'effet photoélectrique ne se produit qu'à partir d'une certaine fréquence.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car l'effet photoélectrique se produit pour une longueur d'onde inférieure ou égale à une valeur seuil, donc pas supérieure.
La proposition B est une bonne réponse car :

$$\lambda_S = \frac{c}{\nu_S} = \frac{3{,}00 \times 10^8}{1{,}2 \times 10^{15}} = 2{,}5 \times 10^{-7} \text{ m} = 250 \text{ nm}$$

La proposition C est une bonne réponse.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car cette énergie est souvent fournie par un photon, mais elle ne sert pas à extraire un photon.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le travail d'extraction est l'énergie à fournir pour extraire un électron, donc ce n'est pas l'énergie libérée.

5 La proposition A est une bonne réponse car :
$W = h \cdot \nu = 6{,}63 \times 10^{-34} \times 1{,}2 \times 10^{15} = 8{,}0 \times 10^{-19}$ J.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le calcul est faux.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le calcul est faux.

6 La proposition A est une bonne réponse car l'énergie apportée par un photon est en partie fournie pour extraire l'électron. L'énergie excédentaire est l'énergie cinétique de l'électron, donc
$h \cdot \nu = E_{\text{c électron}} + W$.
La proposition B est une bonne réponse car
$W = h \cdot \nu_s$, donc :
$h \cdot \nu = E_{\text{c électron}} + h \cdot \nu_s$
La proposition C n'est pas une bonne réponse car $h \cdot \nu = E_{\text{c électron}} + W$.

7 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la résistance est une caractéristique d'un matériau.
La proposition B est une bonne réponse.

La proposition C est une bonne réponse.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le rendement est, par définition :

$\eta = \frac{P_{\text{fournie}}}{P_{\text{reçue}}} \times 100 = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$ et non l'inverse.

La proposition B n'est pas une bonne réponse car le rendement est, par définition :

$\eta = \frac{E_{\text{fournie}}}{E_{\text{reçue}}} \times 100 = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \times 100$ et non l'inverse.

La proposition C est une bonne réponse.

9 La proposition A est une bonne réponse
La proposition B n'est pas une bonne réponse car le générateur est la cellule photovoltaïque.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le voltmètre doit être en dérivation et il faut une résistance variable pour avoir différents couples (U, I).

Acquérir les bases p. 486

› 1. Propriétés de l'effet photoélectrique

10 **1.** Sur le schéma, on voit que la lumière (représentée par des vagues) extrait des électrons (représentés par des ronds) d'un matériau.

2. a. La fréquence seuil est la fréquence minimale de la lumière qui peut extraire un électron d'un matériau.

b. La fréquence seuil se situe entre $4{,}3 \times 10^{-14}$ Hz (pas d'électron extrait) et $5{,}5 \times 10^{-14}$ Hz (électrons extraits).

11 **1.** Vrai. **2.** Faux.
3. Vrai. **4.** Vrai.

12 Nom : photon
Définition : particule de lumière
Masse : nulle
Expression de l'énergie : $E = h \cdot \nu$
Vitesse dans le vide : $c = 3{,}00 \times 10^8\ m \cdot s^{-1}$
Preuve expérimentale d'existence :
effet photoélectrique

13 **a.** Il s'agit du modèle ondulatoire car on parle d'intensité lumineuse seuil.

b. Il s'agit du modèle particulaire car on évoque la notion de photon.

c. Il s'agit du modèle particulaire car on évoque la notion de photon.

d. Il s'agit du modèle ondulatoire car l'énergie cinétique de l'électron dépend de l'intensité lumineuse.

14 **a.** L'effet photoélectrique se produit pour un rayonnement tel que 500 nm $\leqslant \lambda_S$ donc pour Cs, K et Ba.

b. Pour $\nu = 7{,}5 \times 10^{14}$ Hz, $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3{,}00 \times 10^8}{7{,}5 \times 10^{14}} = 400$ nm.

L'effet photoélectrique se produit pour un rayonnement tel que 400 nm $\leqslant \lambda_S$ donc pour Cs, K et Ba.

c. L'effet photoélectrique se produit pour chaque matériau car les UV sont présents avant toutes les longueurs d'onde seuil des matériaux.

15 **1. a.** L'effet photoélectrique est l'extraction d'électrons d'un matériau sous l'effet d'une onde électromagnétique.

b. Les électrons présents au début de l'expérience en **A** sont extraits par le rayonnement UV. Ils ne sont donc plus présents en **B** : l'électroscope est déchargé.

2. a. Non, car l'effet photoélectrique a lieu, pour le zinc, pour $\lambda \leqslant 0{,}37$ µm et le domaine visible est tel que : 400 nm $\leqslant \lambda \leqslant$ 800 nm.

b. Si le dispositif est chargé positivement, on n'observera pas de décharge du dispositif car ce sont les électrons qui peuvent être arrachés.

› 2. Aspect énergétique

16 **1. a**. Le travail d'extraction est l'énergie à fournir pour extraire un électron d'un matériau. Il se note W et s'exprime en joule, de symbole J.

b. $W = h \cdot \nu_S$, avec ν_S la fréquence seuil du matériau.

c. $W = \frac{h \cdot c}{\lambda_S}$

2. En appliquant les relations $\nu_S = \frac{1}{\lambda_S}$ et $W = \frac{h \cdot c}{\lambda_S}$, on obtient :

Matériau	Fréquence seuil	Longueur d'onde seuil
Ag	**$1{,}1 \times 10^{15}$ Hz**	0,27 µm
Pt	$4{,}5 \times 10^{14}$ Hz	**0,67 µm**
Cs	**$1{,}6 \times 10^{15}$ Hz**	0,19 µm
Ca	$6{,}7 \times 10^{14}$ Hz	**0,45 µm**

Matériau	Travail d'extraction
Ag	**$7{,}4 \times 10^{-19}$ J**
Pt	**$3{,}0 \times 10^{-19}$ J**
Cs	**$1{,}1 \times 10^{-18}$ J**
Ca	**$4{,}4 \times 10^{-19}$ J**

3. Plus la longueur d'onde seuil *augmente* et plus le travail d'extraction *diminue*.
Plus la fréquence seuil *augmente* et plus le travail d'extraction *augmente*.

17 **1.** La conservation de l'énergie du photon indique que $E_{photon} = h \cdot \nu = W + E_c$ donc :

$$E_c = h \cdot \nu - W = \frac{h \cdot c}{\lambda} - W$$

AN :

$$E_c = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{450 \times 10^{-9}} - 1{,}95 \times 1{,}602 \times 10^{-19}$$
$$= 1{,}30 \times 10^{-19}\ \text{J} = 0{,}810\ \text{eV}$$

2. $v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}$

AN : $v = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}30 \times 10^{-19}}{9{,}11 \times 10^{-31}}} = 5{,}34 \times 10^{5}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

18 **1. a.** On a : $E_{photon} = h \cdot \nu = W + E_c$

b. On utilise la conservation de l'énergie.

2. a. $E_c = h \cdot \nu - W$

AN :

$E_c = 6{,}63 \times 10^{-34} \times 6{,}0 \times 10^{14} - 2{,}29 \times 1{,}602 \times 10^{-19}$
$= 3{,}1 \times 10^{-20}$ J.

b. $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ donc $v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$.

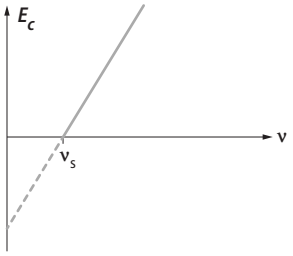
AN : $v = \sqrt{\frac{2 \times 3{,}1 \times 10^{-20}}{9{,}11 \times 10^{-31}}} = 2{,}6 \times 10^{5}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

19 **1.** Si un électron est émis : $\nu \geqslant \nu_S$.

2. a. $E_p = W + E_c$. Cette relation traduit la conservation de l'énergie du photon.

b. $E_p = h \cdot \nu$ et $W = h \cdot \nu_S$ donc : $E_c = h \cdot \nu - h \cdot \nu_S$

c.



d. Pour $\nu \geqslant \nu_S$, $E_c = f(\nu)$ est une droite de coefficient directeur positif.

› 3. Applications de l'interaction photon-matière

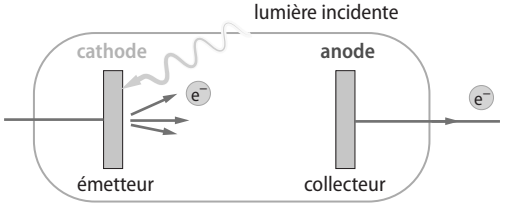
20 **1.**

2. $\eta = \frac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100$

3. $P_{électrique} = P_{lumineuse} \times \frac{\eta}{100}$

AN : $P_{électrique} = 900 \times \frac{11}{100} = 99\ \text{W}$

21 **1.**



tube à vide

2. Si $\nu \geqslant \nu_S$, à la cathode, il y aura un effet photoélectrique et des électrons vont être éjectés.

3. Les électrons partent de la cathode, qui a donc un signe –. Ils sont attirés par l'anode, qui a donc un signe +.

4. On peut citer, par exemple, le luxmètre, instrument qui mesure l'éclairement.

22 **1. a.** Le capteur de lumière utilise l'effet photoélectrique car il produit de l'électricité lorsqu'il reçoit la lumière diffusée par la fumée.

b. La DEL (ou diode électroluminescente) utilise l'effet électroluminescent pour émettre de la lumière.

2. a. Dans le capteur de lumière, il y a absorption de photon.

b. La DEL émet de la lumière, donc elle émet des photons.

3. Si la lumière de la DEL est diffusée par les particules de fumée, elle atteint le capteur de lumière qui, par effet photoélectrique, engendre un courant. Ce courant déclenchera une alarme.

23 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur. Il faut lire U = 0,10 V. Cette erreur a été corrigée dans le manuel de l'élève et les manuels numériques.*

1. $P_{lumineuse} = E \cdot S$

AN : $P_{lumineuse} = \frac{7\ 000}{100} \times 0{,}05 \times 0{,}04 = 0{,}14\ \text{W}$

2. $P_{électrique} = U \cdot I$

AN : $P_{électrique} = 0{,}18 \times 0{,}10 = 0{,}018\ \text{W}$

3. a. $\eta = \frac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100$

AN : $\eta = \dfrac{0{,}018}{0{,}14} \times 100 = 13\ \%$

b. Un rendement de 13 % signifie que 13 % de l'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique et que 87 % de l'énergie lumineuse est « perdue » par réflexion ou convertie sous forme d'énergie thermique.

24 **1.** La cellule photoélectrique convertit l'intensité lumineuse en électricité.

2. L'effet photoélectrique.

3. Cet effet doit avoir lieu pour toute la lumière visible, donc pour la réponse **b. :**
$\lambda_S \leqslant 800$ nm.

25 **1.** La lumière engendre de l'électricité comme dans l'effet photoélectrique. Il y a une valeur d'énergie seuil pour que ce phénomène ait lieu, comme la fréquence seuil dans l'effet photoélectrique.

2. Il faut que $E_{photon} \geqslant \Delta E = 1{,}12$ eV, donc :

$h \cdot \nu \geqslant \Delta E$ soit $\nu \geqslant \dfrac{\Delta E}{h}$ car $h > 0$.

AN : $\dfrac{\Delta E}{h} = \dfrac{1{,}12 \times 1{,}602 \times 10^{-19}}{6{,}63 \times 10^{-34}} = 2{,}71 \times 10^{14}$ Hz

Le domaine de fréquences est donc tel que :
$\nu \geqslant 2{,}71 \times 10^{14}$ Hz

On a : $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$.

AN : $\lambda = \dfrac{3{,}00 \times 10^{8}}{2{,}71 \times 10^{14}} = 1{,}11 \times 10^{-6}$ m.

Le domaine de longueurs d'onde est tel que :
$\lambda \leqslant 1{,}11 \times 10^{-6}$ m

3. a. Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique.
b. Les diodes électroluminescentes convertissent l'énergie électrique en énergie lumineuse.

Faire le point avant d'aller plus loin p. 488

Expliquer pourquoi l'effet photoélectrique ne s'explique qu'avec la notion de photon.
En utilisant l'aspect ondulatoire, l'effet photoélectrique se produirait à partir d'une certaine intensité (l'énergie nécessaire pour extraire l'électron) et non à partir d'une certaine fréquence. Si l'énergie d'un photon est supérieure ou égale à $h \cdot \nu_S$, la lumière ou le rayonnement électromagnétique extrait un électron du matériau.

Citer deux dispositifs qui exploitent l'interaction photon–matière.
On peut citer le spectrophotomètre et la cellule photovoltaïque.

Définir l'effet photoélectrique et la fréquence seuil.
L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons d'un matériau sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique. L'effet photoélectrique se produit à partir d'une fréquence seuil, notée ν_S.

Définir le travail d'extraction, donner son symbole et son unité.
Le travail d'extraction est l'énergie minimale à fournir à un matériau pour extraire un électron. Son symbole est W et son unité est le joule, de symbole J.

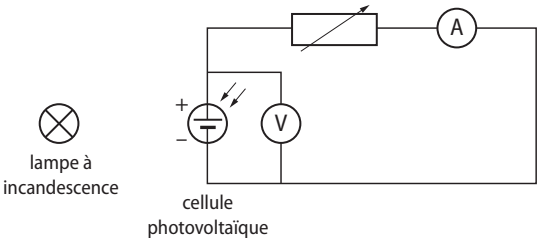
Donner la relation qui permet de calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque en explicitant chaque grandeur et son unité.
Le rendement η d'une cellule photovoltaïque se calcule avec les formules :

$$\eta = \frac{E_{utile}}{E_{fournie}} \times 100 = \frac{E_{électrique}}{E_{lumineuse}} \times 100$$

ou $$\eta = \frac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100$$

avec η en %, E l'énergie en J et P la puissance en W.

Représenter le schéma du circuit électrique et décrire le protocole permettant de déterminer la puissance électrique maximale que peut fournir une cellule photovoltaïque éclairée par une source de lumière de puissance P_{lum}.

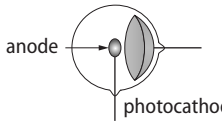


On éclaire la cellule photovoltaïque par une source de lumière de puissance P_{lum} puis on mesure la tension U aux bornes de la cellule pour différentes valeurs de l'intensité I obtenues en variant la valeur de la résistance. Le tracé de $I = f(U)$, le calcul de $P = U \cdot I$ et le tracé de $P = f(U)$ permettent de déterminer la puissance électrique maximale $P_{électrique}$.

Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons émis et la fréquence du rayonnement incident.
Soit un rayonnement de fréquence ν qui éclaire un matériau de fréquence seuil ν_S. Si l'énergie du photon $E_{photon} = h \cdot \nu$ est supérieure au travail d'extraction $W = h \cdot \nu_S$, un électron est extrait du matériau et possède une énergie cinétique E_c correspondant à

l'énergie excédentaire. La conservation de l'énergie implique :
$E_{photon} = W + E_c$ et
$E_c = E_{photon} - W = h \cdot \nu - h \cdot \nu_S = h(\nu - \nu_S)$.

◗ ***Expliquer le fonctionnement de la cellule photoélectrique représentée ci-dessous :***



Lorsque la cellule est reliée à un circuit électrique comprenant une source de tension et que la photocathode est éclairée par un rayonnement de fréquence supérieure à sa fréquence seuil, elle émet des électrons, qui sont collectés à l'anode.

◗ ***Donner deux caractéristiques de l'effet photoélectrique.***
L'émission d'électrons ne se produit qu'à partir d'une fréquence limite, appelée fréquence seuil, qui dépend du matériau étudié mais pas de l'intensité du rayonnement. Le nombre d'électrons émis est proportionnel à l'intensité du rayonnement.

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 489 et 490

27 **1.** L'effet photoélectrique désigne l'extraction d'électrons d'un matériau sous l'effet d'une onde électromagnétique.

2. L'effet photoélectrique a lieu pour $\lambda \leqslant \lambda_S$.
Par définition, le travail d'extraction du zinc s'exprime : $W(Zn) = \dfrac{h \cdot c}{\lambda_S}$.

Donc $\lambda_S = \dfrac{h \cdot c}{W(Zn)}$

AN : $\lambda_S = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^8}{3{,}36 \times 1{,}602 \times 10^{-19}}$

$= 3{,}70 \times 10^{-7}$ m $= 370$ nm

$\lambda \leqslant 370$ nm correspond à des raies d'émission dans le domaine des ultraviolets.

3. La conservation de l'énergie du photon s'exprime :
$h \cdot \nu = E_c + W(Zn)$.

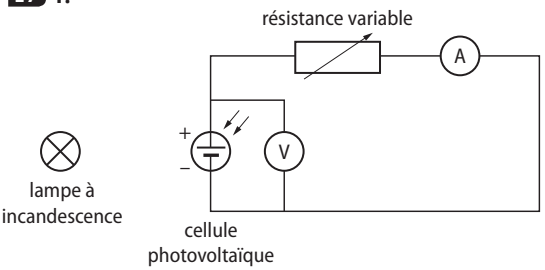
$E_c = \dfrac{h \cdot c}{\lambda} - W(Zn)$

AN :

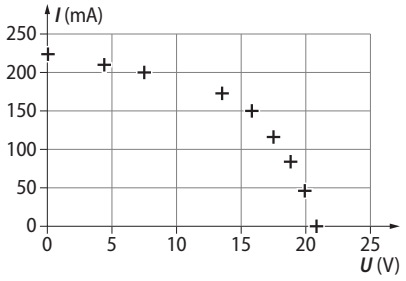
$E_c = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^8}{302 \times 10^{-9}} - 3{,}36 \times 1{,}602 \times 10^{-19}$

$= 1{,}20 \times 10^{-19}$ J

29 **1.**



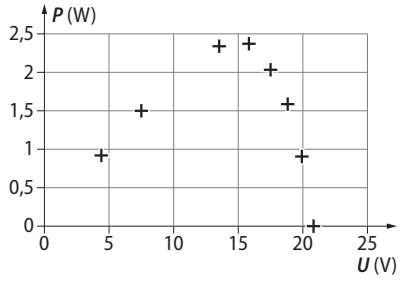
2.



3. a. On calcule $P = U \cdot I$ pour chaque valeur de U :

U (V)	20,8	19,9	18,8	17,5	15,8	13,5	7,5	4,4	0,061
P (W)	0	0,906	1,58	2,03	2,37	2,34	1,50	0,924	0,014

On trace $P = f(U)$.



On lit la valeur maximale : $P_{électrique} = 2{,}4$ W.

b. $\eta = \dfrac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100$

Or $P_{lumineuse} = E \cdot S$, où E est l'éclairement.

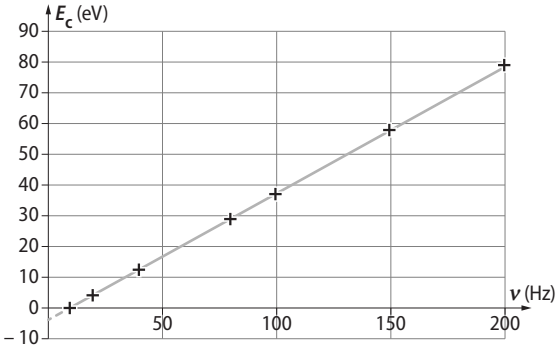
$\eta = \dfrac{2{,}4}{97 \times 0{,}25} \times 100 = 10$ %

c. Un rendement de 10 % signifie que 10 % de l'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique et que 90 % de l'énergie lumineuse est « perdue » par réflexion ou convertie sous forme d'énergie thermique. Ce rendement n'est pas très élevé mais correspond au rendement moyen d'une cellule photovoltaïque.

S'entraîner pour maîtriser p. 491

30 **1.** L'effet photoélectrique ne se produit qu'à partir d'une certaine fréquence, appelée fréquence seuil. En dessous de cette fréquence, il n'y a pas d'électron émis, donc pas d'énergie cinétique.

2. a.



b. On obtient la droite représentative d'une fonction affine croissante.

3. La conservation de l'énergie du photon implique que :
$E = h \cdot \nu = E_c + W$
Donc $E_c = h \cdot \nu - W$. Lorsque $\nu = 0$ Hz, $E_c = -W$.
L'ordonnée à l'origine de la droite $E_c = f(\nu)$ a pour valeur $-W$.
On lit $-W = -4{,}30$ eV, donc $W = 4{,}30$ eV.

31 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur sur le schéma B. Il faut lire U_{01} U_{02} et U_{03} sur l'axe des abscisses. Cette erreur a été corrigée sur le manuel élève et sur les manuels numériques.*

1. On constate sur le schéma **B** que $-U_0$ est proportionnelle à ν car, quand ν est multipliée par 2, $-U_0$ est multipliée par 2 et, quand ν est multipliée par 3, $-U_0$ est multipliée par 3. Or $-U_0 = E_c / e$, avec e la charge de l'électron, donc une constante. Donc U_0 est proportionnel à E_c et proportionnel à ν. On en déduit que E_c est proportionnelle à ν.

2. On constate sur le schéma **A** que, quand la puissance P est multipliée par 2, l'intensité I_{cc} du courant de saturation est multipliée par 2 ; quand la puissance P est multipliée par 3, l'intensité I_{cc} du courant de saturation est multipliée par 3. L'intensité du courant de saturation I_{cc} est proportionnelle à la puissance P de la source.

3. Dans le modèle ondulatoire de la lumière, l'énergie cinétique de l'électron ne serait pas proportionnelle à la fréquence de la lumière mais à son intensité.

32 **> Démarche experte**
Voir *Démarche avancée*.

> Démarche avancée
1. La conservation de l'énergie implique :
$E_{photon} = h \cdot \nu = W + E_c$ donc :
$W = h \cdot \nu - E_c$
$= 6{,}63 \times 10^{-34} \times 7{,}5 \times 10^{14} - 1{,}0 \times 10^{-19}$
$= 4{,}0 \times 10^{-19}$ J

2. On a $W = h \cdot \nu_S = \dfrac{h \cdot c}{\lambda_S}$.

Donc $\lambda_S = \dfrac{h \cdot c}{W}$.

AN : $\lambda_S = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{4{,}0 \times 10^{-19}} = 5{,}0 \times 10^{-7}$ m.

Le métal identifié est le baryum, qui a une longueur d'onde seuil de 500 nm.

33 ***Prix Nobel***
Extrait du discours de S. Arrhenius lors de la remise du prix Nobel de physique à Albert Einstein en 1921.
« Les travaux pour lesquels Einstein a reçu le prix Nobel concernent le domaine de la physique quantique, introduite par Planck en 1900. Selon cette théorie, l'énergie radiative est constituée de particules, appelées « quanta », de la même manière que la matière est constituée de particules, c'est-à-dire les atomes. Cette théorie remarquable, pour laquelle Planck a reçu le prix Nobel de physique en 1918, a rencontré de nombreux obstacles et, vers le milieu de la première décennie de ce siècle, s'est trouvée dans une impasse. C'est alors qu'Einstein est intervenu avec ses travaux sur la capacité thermique et l'effet photoélectrique [...] L'aspect le plus extraordinaire de cet effet est que la vitesse d'émission d'un électron ne dépend pas de l'intensité de la lumière incidente, laquelle est proportionnelle seulement au nombre d'électrons, tandis que la vitesse augmente avec la fréquence de la lumière.
[Selon Einstein], quand un quantum de lumière arrive sur une plaque métallique, il peut transférer la plupart de son énergie à un électron qui s'y trouve. Une partie de cette énergie est consommée pour expulser l'électron dans l'air, l'énergie restante étant conservée par l'électron sous forme d'énergie cinétique. Cela concerne les électrons à la surface du métal. L'électron ne peut s'échapper dans l'air que si le quantum contient suffisamment d'énergie pour que l'électron effectue le travail nécessaire à son extraction du métal. Par conséquent, seule la lumière dont la fréquence est supérieure à une certaine limite est capable de générer l'effet photoélectrique, quelle que soit l'intensité du rayonnement incident. Si cette limite est dépassée, l'effet est proportionnel à l'intensité lumineuse à une fréquence constante. »

1. a. Einstein a reçu le prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'effet photoélectrique.

b. Ces travaux ont remis sur le devant de la scène l'aspect particulaire de la lumière et ont contribué à l'émergence de la physique quantique.

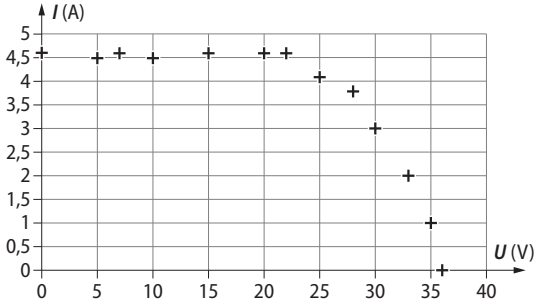
2. Voir les phrases soulignées dans le texte ci-avant.

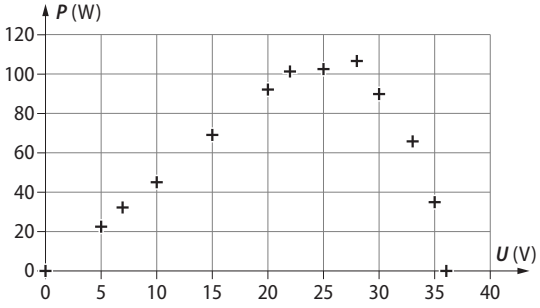
3. a. Le quantum d'énergie s'appelle photon.
b. Il a une masse nulle, une énergie telle que $E = h \cdot \nu$ et une vitesse dans le vide $c = 3{,}00 \times 10^8\ m \cdot s^{-1}$.

4. On peut citer l'utilisation de l'effet photoélectrique dans les détecteurs de présence et dans les spectrophotomètres, pour mesurer l'absorbance par exemple.

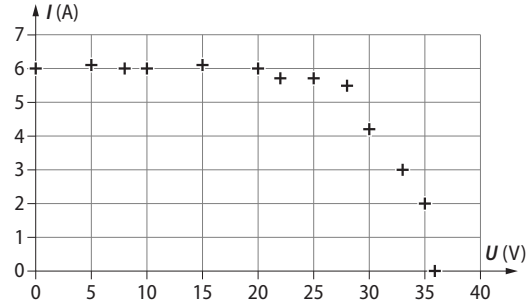
34 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur. Les données sur l'incertitude sont manquantes. Il faut lire : $u(P_m) = 1$ W, $u(E) = 1\ W \cdot m^{-2}$ et $u(S) = 0{,}05\ m^2$. Cette erreur a été rectifiée dans le manuel élève et les manuels numériques.*

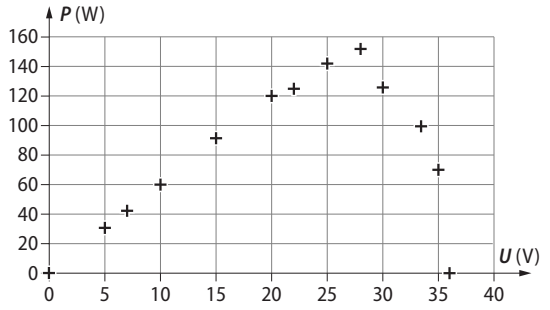
1. a. et **b.**
Pour un éclairement de $600\ W \cdot m^{-2}$:





Pour un éclairement de $800\ W \cdot m^{-2}$:





2. a. Pour un éclairement de $600\ W \cdot m^{-2}$:
$P_{électrique} = P_m = 106$ W

$$\eta = \frac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100 = \frac{P_{électrique}}{E \cdot S} \times 100$$

AN : $\eta = \dfrac{106}{600 \times 1{,}5} \times 100 = 12\ \%$

Pour un éclairement de $800\ W \cdot m^{-2}$:
$P_{électrique} = P_m = 154$ W

$$\eta = \frac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100 = \frac{P_{électrique}}{E \cdot S} \times 100$$

AN : $\eta = \dfrac{154}{800 \times 1{,}5} \times 100 = 13\ \%$

b. On applique la formule donnée.
Pour un éclairement de $600\ W \cdot m^{-2}$:

$$u(\eta) = 12 \times \sqrt{\left(\frac{1}{106}\right)^2 + \left(\frac{1}{600}\right)^2 + \left(\frac{0{,}05}{1{,}5}\right)^2}$$
$$= 0{,}4\ \%$$

Pour un éclairement de $800\ W \cdot m^{-2}$:

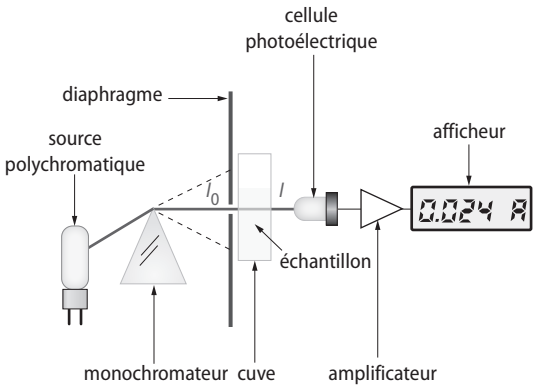
$$u(\eta) = 13 \times \sqrt{\left(\frac{1}{154}\right)^2 + \left(\frac{1}{800}\right)^2 + \left(\frac{0{,}05}{1{,}5}\right)^2}$$
$$= 0{,}4\ \%$$

3. L'éclairement a une influence (légère) sur le rendement.

35 Exemple d'exposé oral

Une cellule photoélectrique est constituée de deux électrodes : la **cathode** et **l'anode**, enfermées dans un tube vide ou rempli d'un gaz inerte. Lorsque la cellule est reliée à un circuit électrique comprenant une source de tension et que la cathode est éclairée par un rayonnement de fréquence supérieure à sa **fréquence seuil**, elle émet des **électrons** qui sont collectés à l'anode. Le **courant électrique** obtenu augmente avec le nombre de photons émis, donc l'**intensité lumineuse** de la source de rayonnement.

• *Principe du spectrophotomètre :*
Un spectrophotomètre est utilisé pour mesurer l'absorbance dans le domaine du visible d'une solution colorée. Son principe simplifié est schématisé ci-dessous :



Une cellule photoélectrique convertit la lumière reçue en électricité, ce qui lui permet de comparer l'intensité de la lumière incidente et l'intensité de la lumière transmise par la cuve contenant la solution en comparant les deux courants électriques correspondants et de calculer ainsi l'absorbance.
Le spectromètre a un fonctionnement similaire. Il mesure l'intensité de la lumière en la convertissant en électricité grâce à une cellule photoélectrique pour différentes longueurs d'onde, ce qui permet de tracer des spectres.

• *Principe du photomultiplicateur :*
Le photomultiplicateur est utilisé couplé à un scintillateur pour détecter des particules comme des particules cosmiques ou celles issues d'un accélérateur. Les particules excitent un scintillateur qui émet alors des **photons** dans le domaine du visible, lesquels provoquent l'émission d'électrons à la cathode du photomultiplicateur. Un système d'électrodes, appelées dynodes, permet de démultiplier le nombre d'électrons (par succession d'émissions secondaires). On mesure alors le courant obtenu à l'anode du photomultiplicateur.

• *Principe du luxmètre :*
Le luxmètre est un appareil qui mesure des éclairements lumineux, donc la quantité de lumière reçue. Il est équipé d'une cellule photoélectrique ou d'une photodiode au silicium. Le signal électrique produit dévie une aiguille ou commande un affichage numérique.

36 Exemple d'exposé oral

Pour expliquer l'effet photoélectrique, on utilise la formule de Planck, qui postule la quantification de l'énergie et l'aspect particulaire de la lumière. Cette explication de l'effet photoélectrique a donné une légitimité aux postulats de la physique quantique et a donc ouvert la voie à cette nouvelle branche de la physique.
Le luxmètre et la cellule photovoltaïque exploitent l'interaction lumière-matière. Dans le premier, une cellule photoélectrique émet un courant électrique proportionnel à l'intensité lumineuse ce qui permet la mesure de cette dernière. Dans le deuxième, la jonction PN permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Développer ses compétences p. 493

37 *Une erreur s'est glissée dans de spécimen du professeur. Dans les données, il faut lire $E_c = e \cdot U_0$. Cette erreur a été rectifiée sur le manuel élève et sur les manuels numériques.*

› Questions préliminaires

1. Une onde électromagnétique de fréquence ν est un ensemble de particules d'énergie $h \cdot \nu$.

2. La conservation de l'énergie implique :
$E_{photon} = h \cdot \nu = W + E_c$
$W = h \cdot \nu_S$ donc $E_c = h(\nu - \nu_S)$.

3. Soit a le coefficient directeur. On prend les points de coordonnées :
$(43{,}9 \times 10^{13} ; 0)$ et $(93 \times 10^{13} ; 2)$.

$$a = \frac{0-2}{(43{,}9-93)\times 10^{13}} = 4{,}1 \times 10^{-15}\ \text{V} \cdot \text{s}$$

› Problématique

Le coefficient directeur de la droite est égal à $\frac{h}{e}$ car $E_c = e \cdot U_0$.

Donc $U_0 = \frac{E_c}{e} = \frac{h \cdot \nu - h \cdot \nu_S}{e} = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{h \cdot \nu_S}{e}$.

Donc si $a = \frac{h}{e}$, $h = a \cdot e$.

La valeur de h déterminée par Millikan est donc :
$h = a \cdot e = 4{,}1 \times 10^{-15} \times 1{,}60 \times 10^{-19}$
$= 6{,}56 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$
La valeur de h actuellement admise est :
$6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$.
Ces deux valeurs sont proches. L'écart relatif est de :

$$\frac{|6{,}56 - 6{,}63| \times 10^{-34}}{6{,}63 \times 10^{-34}} \times 100 = 1{,}1\ \%,$$

ce qui est très faible.

38 > Questions préliminaires

1. a. Pour la photodiode, c'est la lumière qui implique une modification de la matière et, pour la DEL, c'est la matière qui, en subissant une modification, va émettre de la lumière.
b. On peut citer la cellule photovoltaïque.

2. a. Le photon est une particule de lumière qui a une masse nulle, une énergie $E = h \cdot \nu$ (pour une lumière de fréquence ν) et une vitesse de $3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1} dans le vide.

b. $E \geqslant E_{gap}$, donc $h \cdot \nu \geqslant E_{gap}$ donc :

$\frac{h \cdot c}{\lambda} \geqslant E_{gap}$, donc $\lambda \leqslant \frac{h \cdot c}{E_{gap}}$.

Les calculs donnent :

- Si : $\lambda \leqslant 1{,}11 \times 10^{-6}$ m

Domaines : γ, X, UV, visible, IR.

- GaSb : $\lambda \leqslant 1{,}83 \times 10^{-6}$ m

Domaines : γ, X, UV, visible, IR.

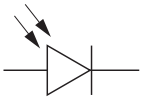
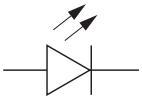
- GaP : $\lambda \leqslant 5{,}52 \times 10^{-7}$ m

Domaines : γ, X, UV, visible.

- GaAs : $\lambda \leqslant 8{,}68 \times 10^{-7}$ m

Domaines : γ, X, UV, visible.

> Synthèse

	Photodiode	DEL
Principe	Un photon d'énergie supérieure au gap fait passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction, ce qui provoque l'apparition d'un courant électrique.	L'électricité fournie lorsque la DEL est en sens passant provoque une recombinaison électron-trou, ce qui émet un photon.
Schéma		
Absorption ou émission	Absorption de photons	Émission de photons
Utilisation	Capteur de lumière	Éclairage

39 › Questions préliminaires

1. Pour un éclairement E de 800 W · m^{-2} et une surface $S = 1{,}50$ m^2 :

$P_{lumineuse} = E \cdot S$

AN : $P_{lumineuse} = 800 \times 1{,}50 = 1\,200$ W

$P_{électrique} = U \cdot I$

D'après le document, le point de fonctionnement de puissance maximale pour un éclairement de 800 W · m^{-2} correspond à $U = 36$ V et $I = 5{,}5$ A.

AN : $P_{électrique} = 36 \times 5{,}5 = 198$ W

$$\eta = \frac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100$$

AN : $\eta = \frac{198}{1\,200} \times 100 = 17$ %

2. À Orléans, l'énergie reçue est en moyenne de 3,4 kWh · m^{-2} · j^{-1}, donc 3,4 kWh pour 1 m^2 et 1 jour. Pour une année, l'énergie reçue pour 1 m^2 est $3{,}4 \times 365{,}25 = 1{,}2 \times 10^3$ kWh · m^{-2}.

› Problématique

L'énergie électrique à produire par les panneaux photovoltaïques est :

$5\,000 \times \frac{50}{100} = 2\,500$ kWh,

soit 50 % de l'énergie totale consommée. Le rendement des cellules est de 17 %, cela signifie qu'il faut que les panneaux reçoivent :

$$E_{lumineuse} = E_{électrique} \times \frac{100}{\eta}$$

AN : $E_{lumineuse} = 2\,500 \times \frac{100}{17} = 1{,}5 \times 10^4$ kWh.

Les panneaux doivent donc recevoir en un an une énergie de $1{,}5 \times 10^4$ kWh. Or, à Orléans, l'énergie lumineuse reçue pour 1 m^2 et par an est $1{,}2 \times 10^3$ kWh.

Donc la surface à couvrir est :

$S = \frac{1{,}5 \times 10^4}{1{,}2 \times 10^3} = 13$ m^2

40 1. a. Il s'agit de l'effet photoélectrique.

b. Le domaine du visible se situe entre 400 et 800 nm.

On doit avoir $\lambda \leqslant 800$ nm $= \lambda_S$ donc :

$\nu \geqslant \nu_S = \frac{c}{\lambda_S}$

AN : $\nu_S = \frac{3{,}00 \times 10^8}{800 \times 10^{-9}} = 3{,}75 \times 10^{14}$ Hz.

c. Pour expliquer l'effet photoélectrique, il faut utiliser le modèle particulaire de la lumière, donc la notion de photons.

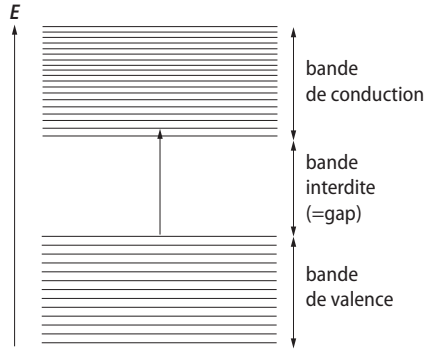
2. $E \geqslant E_{gap}$

a. Pour le silicium : $E \geqslant 1{,}12$ eV.

b. Pour le germanium $E \geqslant 0{,}66$ eV.

3. a. L'énergie des atomes ne peut pas prendre n'importe quelle valeur.

b.

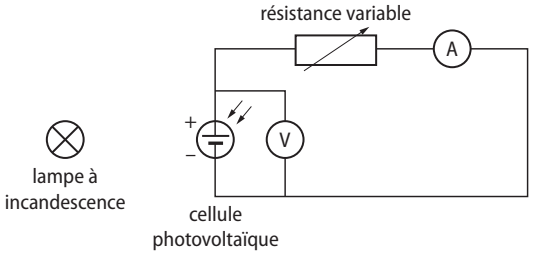


POUR PRÉPARER L'ECE *p. 496*

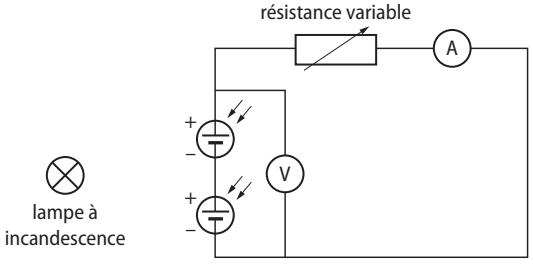
1. Proposition de protocole expérimental

On commence par tracer la caractéristique de la cellule (circuit 1), puis la caractéristique de 2 cellules identiques (circuit 2) en série et 2 cellules identiques en dérivation (circuit 3).

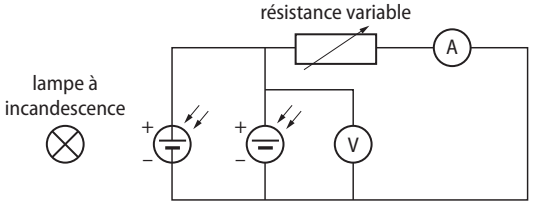
Circuit 1



Circuit 2 :



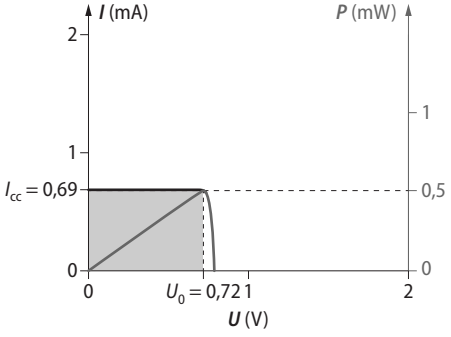
Circuit 3 :



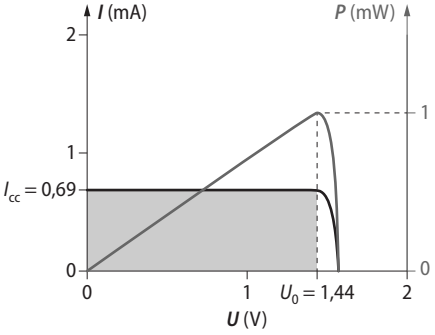
3. Exploitation du résultat obtenu

On donne ci-dessous des exemples de résultats obtenus.

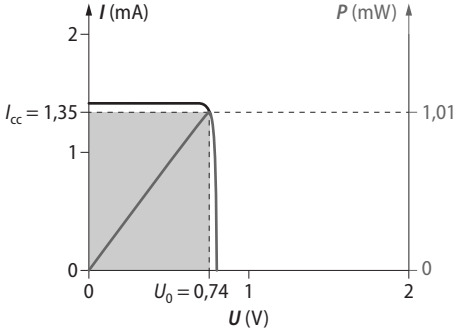
• Circuit 1 :



• Circuit 2 :



• Circuit 3 :



	Cellule seule	2 cellules en série	2 cellules en dérivation
Courant de saturation	I_{cc}	$I_{cc(série)} = I_{cc}$	$I_{cc(dérivation)} = 2I_{cc}$
Tension à vide	U_0	$U_{0(serie)} = 2U_0$	$U_{0(dérivation)} = U_0$
Puissance maximale	P_m	$P_{m(série)} = 2P_m$	$P_{m(dérivation)} = 2P_m$
Rendement	η	2η	2η

Le calcul de P est $P = U \cdot I$.

Le rendement se calcule par la relation :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{lumineuse}} \times 100$$

Les sources d'incertitudes sont, par exemple :
– les incertitudes de mesure de l'intensité, de la tension, de la puissance maximale et de la puissance lumineuse ;
– un éclairement non uniforme des deux cellules ;
– des cellules non exactement identiques.

CHAPITRE 20

Manuel p. 498

Dynamique d'un système électrique

LE PROGRAMME

Notions et contenus	Capacités exigibles *Activités expérimentales support de la formation*
Intensité d'un courant électrique en régime variable.	Relier l'intensité d'un courant électrique au débit de charges.
Comportement capacitif.	Identifier des situations variées où il y a accumulation de charges de signes opposés sur des surfaces en regard.
Modèle du condensateur. Relation entre charge et tension ; capacité d'un condensateur.	Citer des ordres de grandeur de valeurs de capacités usuelles. *Identifier et tester le comportement capacitif d'un dipôle.* *Illustrer qualitativement, par exemple à l'aide d'un microcontrôleur, d'un multimètre ou d'une carte d'acquisition, l'effet de la géométrie d'un condensateur sur la valeur de sa capacité.*
Modèle du circuit RC série : charge d'un condensateur par une source idéale de tension, décharge d'un condensateur, temps caractéristique.	Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge par une source idéale de tension et dans le cas de sa décharge.
Capteurs capacitifs.	Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs capacitifs. *Étudier la réponse d'un dispositif modélisé par un dipôle RC.* *Déterminer le temps caractéristique d'un dipôle RC à l'aide d'un microcontrôleur, d'une carte d'acquisition ou d'un oscilloscope.* **Capacité mathématique :** Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

p. 498

SITUATION 1

Cette situation permet d'associer le terme « électricité » à un phénomène courant, déjà rencontré par les élèves dans leur vie quotidienne. Il s'agit ici de vérifier que les élèves connaissent les termes « électrostatique », « charges électriques », « électrons »…

› Exemple de réponse attendue

Lorsqu'on retire un pull ou que l'on s'approche de l'écran d'une télévision, les cheveux peuvent devenir hirsutes et semblent se dresser sur la tête. Ce phénomène, appelé « électricité statique », s'explique par une accumulation de charges électriques à la surface des cheveux, très légers, qui se repoussent.

› En classe de Terminale

Les élèves découvriront que le phénomène d'accumulation de charges électriques peut être exploité dans la constitution des condensateurs.

SITUATION 2

Dans cette situation, les élèves sont invités à réinvestir les lois de l'électricité rencontrées régulièrement depuis le cycle 4. Le montage à étudier permet de revenir sur la distinction entre générateur et récepteur, sur la notion de circuit électrique et sur l'utilisation des appareils de mesure.

› Exemple de réponse attendue

La pile et la lampe sont en série et constituent une maille dans le circuit électrique. D'après la loi d'additivité des tensions, la somme algébrique des tensions dans cette maille est nulle. La lecture du voltmètre nous permet de dire que la pile délivre une tension de 4,31 V.

› En classe de Terminale

Les élèves devront maîtriser les lois de l'électricité afin de pouvoir étudier le modèle du circuit RC série et exprimer la tension aux bornes d'un condensateur.

ACTIVITÉS

p. 500 ACTIVITÉ 1

Capacité d'un condensateur

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité offre aux élèves la possibilité de se représenter la structure schématique d'un condensateur en identifiant les électrodes et le diélectrique ainsi que le modèle d'accumulation de charges de signes opposés sur des surfaces en regard.

Ce dispositif permet d'illustrer qualitativement l'effet de la géométrie d'un condensateur sur la valeur de sa capacité. Le dispositif expérimental ad hoc peut être remplacé par deux plaques métalliques fixées sur des supports en bois et reliées au circuit par des pinces crocodiles.

Les plaques fournies peuvent être les suivantes : du polystyrène, du bois, du plexiglas et du verre.

› Démarche experte

Voir *Démarche élémentaire* : on étudie successivement l'influence de la surface du condensateur, de l'écartement de la distance entre les deux armatures et de la nature du matériau entre les armatures.

› Démarche avancée

1. b. La capacité d'un condensateur plan dépend de la surface des armatures, de la distance et de la nature du matériau isolant.

2. a. Voir *Démarche élémentaire.*

b. On ne peut étudier l'influence d'un paramètre qu'en ne modifiant pas les autres.

3. Oui.

› Démarche élémentaire

1. Les mesures effectuées montrent que la valeur de la capacité mesurée augmente quand la surface des électrodes augmente. Si plusieurs électrodes sont disponibles, la proportionnalité entre C et S peut être aisément vérifiée.

2. Les mesures effectuées doivent montrer que la valeur de la capacité mesurée diminue quand l'écartement des électrodes augmente. On peut également montrer que la valeur de la capacité mesurée est inversement proportionnelle à la distance entre les électrodes.

3. Les mesures effectuées montrent que la valeur de la capacité mesurée dépend de la nature du matériau entre les armatures. Pour les matériaux suivants, les capacités mesurées sont telles que :
$C_{\text{polystyrène}} < C_{\text{bois}} < C_{\text{plexiglas}} < C_{\text{verre}}$.

4. Les mesures réalisées sont en accord avec la relation mathématique donnée dans le doc. 2 : la capacité est proportionnelle à la surface, inversement proportionnelle à la distance, et varie selon le matériau isolant.

p. 501 ACTIVITÉ 2

Comportement capacitif d'un dipôle

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité permet d'identifier le comportement capacitif d'un dipôle par identification d'une avance de phase de l'intensité sur la tension. Cette activité offre l'occasion aux élèves de manipuler l'oscilloscope ou le dispositif ExAO. Une difficulté pour les élèves est de comprendre que la tension u_R offre une représentation de l'intensité dans le circuit. Une vigilance est nécessaire pour éviter la confusion entre courant et tension. À la question 5, on pourra utiliser comme dipôles masqués, par exemple, un conducteur ohmique, une bobine et un condensateur.

› Exploitation et analyse

1. a. D'après la loi d'Ohm : $u_R(t) = R \cdot i(t)$

b. Le signal $u_R(t)$ est donc proportionnel à $i(t)$. Le comportement temporel de ces deux grandeurs est donc identique : seule l'amplitude varie.

2. Dans le circuit, la masse du GBF et celle de l'oscilloscope sont identiques. La voie A mesure donc bien la tension u_C mais la voie B mesure la tension $u_C + u_R$. Pour visualiser u_R, il faut donc soustraire u_C.

3. Si le dipôle D est un conducteur ohmique, on observe que les deux signaux sont en phase. Il n'y a pas de déphasage entre la tension et l'intensité du courant.

4. Sur l'oscillogramme du doc. 1, on observe que le signal $u(t)$ s'annule avant le signal $i(t)$. On peut donc dire que le signal $u(t)$ est en avance de phase sur le signal $i(t)$.

› Conclusion

5. Les trois dipôles inconnus doivent être placés successivement à la place du dipôle D représenté

sur le schéma. Les dipôles pour lesquels on constatera que $i(t)$ est en avance de phase sur $u(t)$ (doc. 2) ont un comportement capacitif.

p. 502 ACTIVITÉ 3

Flash photographique et condensateur

Commentaires pédagogiques

Cette activité invite les élèves à étudier la réponse d'un dispositif modélisé par un dipôle RC en déterminant le temps caractéristique de ce dipôle à l'aide d'un dispositif d'enregistrement. Elle permet également aux élèves de tester l'influence des paramètres R et C sur ce temps de réponse.

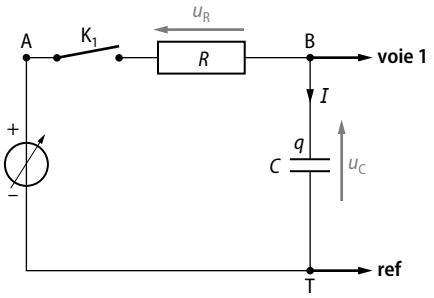
› Expériences et mesures

1. a. $\tau_{th} = R \cdot C = 470 \times 1{,}0 \times 10^{3} \times 10^{-6} = 0{,}47$ s

b. La durée d'acquisition pourra donc être égale à : $5\ \tau_{th} = 5 \times 0{,}47 = 2{,}4$ s

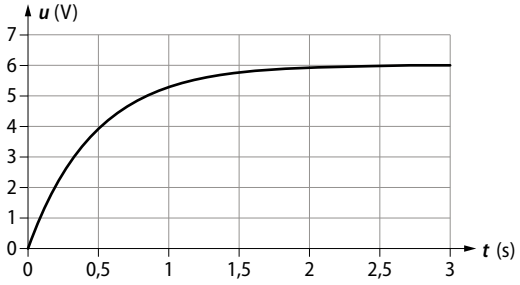
c. Une fois la durée d'acquisition fixée, on choisit le nombre de points de mesure le plus élevé pour avoir le plus de précision.

2.



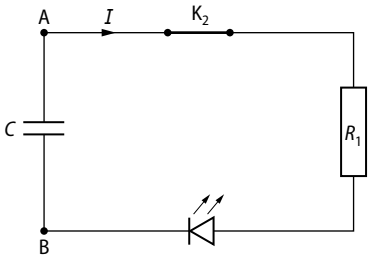
› Exploitation et analyse

3. Sur une charge du condensateur, on obtient par exemple :



Pour déterminer τ_{exp}, on utilise la tangente à l'origine ou on prend l'abscisse du point d'ordonnée $0{,}63 \times E$. On obtient, dans l'exemple précédent : $\tau_{exp} = 0{,}48$ s. Cette valeur est très proche de la valeur théorique.

4. a.



b. Si la valeur de la résistance diminue, alors le temps caractéristique diminue. Le flash sera donc plus bref.

c. L'observation expérimentale est cohérente avec le raisonnement précédent.

5. Le condensateur n'est pas totalement déchargé car la courbe n'atteint pas l'axe des abscisses. Ce phénomène est dû à la présence de la DEL dans le circuit.

› Synthèse

6. Le circuit précédent permet de modéliser le fonctionnement d'un flash photographique. Le générateur représente la batterie de l'appareil photographique. Il suffit alors de choisir les valeurs de R_1 et de C afin d'obtenir un temps caractéristique qui appartient à l'intervalle de temps défini par le document.

p. 503 ACTIVITÉ 4

Temps caractéristique et capacité

Commentaires pédagogiques et compléments expérimentaux

Cette activité invite les élèves à utiliser un dispositif microcontrôleur pour déterminer le temps caractéristique d'un dipôle RC. Les performances des microcontrôleurs permettent l'identification d'une valeur de seuil et la mesure d'une grandeur associée. L'appropriation de l'activité nécessite que les élèves aient compris que la plage de mesure des microcontrôleurs est de 1023 bits.

› Questions préliminaires

1. La ligne 15 permet de définir la valeur de la tension de seuil de $0{,}63E$ à partir de laquelle le microcontrôleur doit mesurer la durée correspondant au temps caractéristique.

2. Dans les lignes 17 et 18, on exploite la relation $\tau = R \cdot C$ avec une résistance de 22 kΩ.

› Le problème à résoudre

Le microcontrôleur et le circuit précédent peuvent ainsi constituer un capacimètre. Il est en effet possible de déterminer la capacité du condensateur étudié à partir de la connaissance de la valeur de la résistance R du conducteur ohmique utilisé et de

la mesure du temps caractéristique. Il faudra alors modifier la valeur « 22000 » de la ligne 18 par la valeur de la résistance *R*.

EXERCICES

Vérifier l'essentiel p. 509

1 La proposition A n'est pas une bonne réponse car les armatures d'un condensateur sont conductrices.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car il faut un isolant entre les armatures d'un condensateur.

2 La proposition A n'est pas une bonne réponse car un condensateur ne coupe pas le circuit.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car les armatures d'un condensateur peuvent être chargées.

3 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la charge est notée $-q$.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car l'armature B porte une charge électrique q.

4 La proposition A n'est pas une bonne réponse car $q = C \cdot u$.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car $q = C \cdot u$.
La proposition C est une bonne réponse.

5 La proposition A est une bonne réponse car $i = \dfrac{dq}{dt}$ et $q = C \cdot u$, donc $i = C \cdot \dfrac{du}{dt}$.
La proposition B n'est pas une bonne réponse car $i = \dfrac{dq}{dt}$.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car $i = \dfrac{dq}{dt}$ et $q = C \cdot u$ donc $i = C \cdot \dfrac{du}{dt}$.

6 La proposition A n'est pas une bonne réponse car la tension ne peut pas diminuer lors d'une charge.
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car la tension augmente avant de se stabiliser.

7 La proposition A est une bonne réponse car le temps caractéristique a pour expression $\tau = R \cdot C$.
La proposition B est une bonne réponse car le temps caractéristique a pour expression $\tau = R \cdot C$.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le temps caractéristique ne dépend pas de *E*.

8 La proposition A n'est pas une bonne réponse car :
$\tau = R \cdot C = 10 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-9} = 10^{-3}$ s
La proposition B est une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse.

9 La proposition A n'est pas une bonne réponse car le temps caractéristique a pour expression $\tau = R \cdot C$, donc la durée de charge dépend aussi de la résistance.
La proposition B est une bonne réponse car le temps caractéristique a pour expression $\tau = R \cdot C$.
La proposition C n'est pas une bonne réponse car le temps caractéristique a pour expression $\tau = R \cdot C$, donc la durée de charge dépend aussi de la capacité du condensateur.

10 La proposition A est une bonne réponse car le temps caractéristique correspond à l'abscisse de $0{,}63 \times U_{max} = 0{,}63 \times 5{,}0 = 3{,}2$ V. Par lecture graphique, on trouve $\tau = 0{,}1$ s.
La proposition B n'est pas une bonne réponse.
La proposition C n'est pas une bonne réponse.

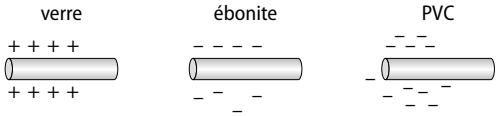
Acquérir les bases p. 510

Une erreur de numérotation des exercices s'est glissée dans le spécimen du professeur : il faut ajouter 2 au numéro de chaque exercice à partir de la page 510. Cette erreur a été rectifiée dans le manuel de l'élève et dans les manuels numériques.
Les corrigés suivants tiennent compte de la numérotation rectifiée.

› 1. Le modèle du condensateur

11 Lorsque le plumeau est secoué, les fibres qui le composent subissent les frottements de l'air. Ces frottements (comme les cheveux avec un pull) vont provoquer une accumulation de charges en surface des fibres. En approchant le plumeau des surfaces, les poussières de charges opposées seront attirées par le plumeau.

12 **1.**



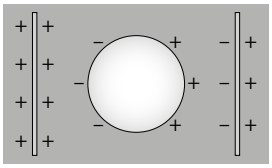
2. Les phénomènes de répulsion et d'attraction peuvent être modélisés par les forces électrostatiques, vues en classe de 1re.

13 **1.** Les signes + et – figurent des zones d'accumulation de charges positives et de charges négatives. Par exemple, il y a une accumulation de charges positives dans les nuages d'altitude et au niveau du sol et une accumulation de charges négatives dans les nuages bas.

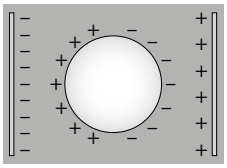
2. L'apparition d'éclairs correspond à un retour brutal à l'équilibre des charges électriques entre deux zones distinctes, par exemple entre les nuages bas et le sol.

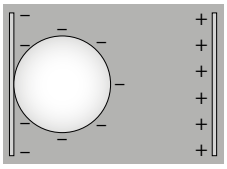
14 **1.** Sur l'électrode reliée à la borne négative du générateur, il y a accumulation de charges – et accumulation de charges + sur l'autre.

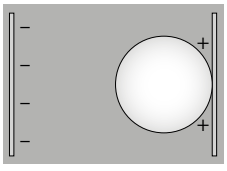
2. L'électrode la plus proche va perturber la répartition des charges électriques à la surface de la boule, qui va alors subir une force attractive.

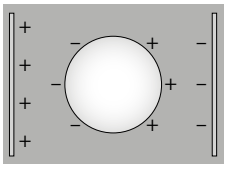


3. Lorsque la boule entre en contact avec l'électrode, la répartition des charges est modifiée et la boule se charge. Elle est alors attirée par l'électrode située en face, qui porte une charge électrique opposée.









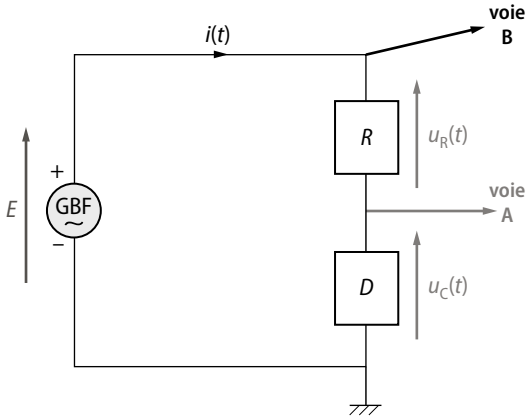
15 **1.** Faux. Les courbes représentants $u(t)$ et $i(t)$ sont extrémales et nulles aux mêmes instants. Ces deux grandeurs sont donc en phase.

2. Faux. La courbe $u(t)$ s'annule avant la courbe $i(t)$. L'intensité du courant est donc en retard de phase sur la tension.

3. Faux. L'intensité du courant n'est pas en avance de phase sur la tension, le dipôle n'a pas un comportement capacitif.

4. Faux. Quand une grandeur est maximale, l'autre est minimale et inversement. Les deux grandeurs sont en opposition de phase.

16 **1.**



2. L'intensité est en retard de phase sur la tension. Ce dipôle n'a pas un comportement capacitif.

17 **1.** Si $q_A = 4{,}8\ \mu C$, alors $q_B = -4{,}8\ \mu C$.

2. a. Comme $q_B < 0$, elle porte un excès d'électrons.
b. Cette situation est donc représentée par le schéma C.

3. Dans ce cas, le signe de la tension u_{AB} est positive.

18 ***Charge et tension***

Un condensateur céramique de capacité 10 nF est chargé avec une tension de 6,0 V.
Quelle est la charge portée par chacune des plaques qui le constituent ?

$q = C \cdot U = 10 \times 10^{-9} \times 6{,}0 = 6{,}0 \times 10^{-8}\ C$

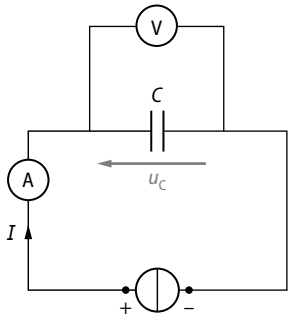
19 **1. a.** On a $q = I \cdot \Delta t$ et $q = C \cdot u$, donc :

$$C = \frac{I \cdot \Delta t}{u} = \frac{12 \times 10^{-3} \times 60}{1{,}5} = 0{,}48\ F = 480\ mF.$$

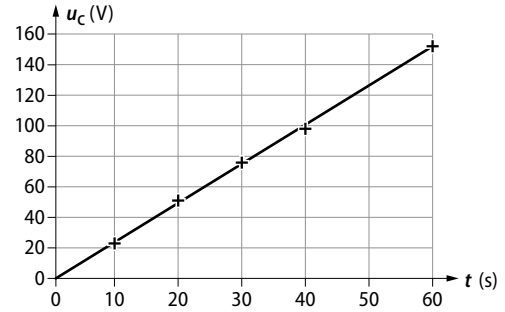
b. Sur la photographie, l'unité est le microfarad. Les valeurs sont différentes d'un facteur 1 000.

2. Il s'agit d'une valeur élevée pour une capacité usuelle.

20 **1.**



2. a.



b. D'après le graphique, on peut dire que la tension u_C et la durée de fonctionnement sont proportionnelles. Ce résultat expérimental est cohérent avec la relation vue en cours.

c. Le coefficient directeur de la droite est relié à la valeur de la capacité du condensateur.

$q = C \cdot u_C$ et $q = I \cdot \Delta t$ donc : $u_C = \dfrac{I}{C} \cdot \Delta t$.

Le calcul du coefficient directeur permet donc de calculer la capacité C du condensateur :

$$C = \frac{I \cdot \Delta t}{u_C} = \frac{1{,}0 \times 10^{-3} \times 60}{152} = 3{,}9 \times 10^{-4}\ \text{F}$$

21 $q = C \cdot U$ et $q = I \cdot \Delta t$ donc :

$$\Delta t = \frac{C \cdot U}{I} = \frac{330 \times 10^{-6} \times 42}{2{,}0 \times 10^{-3}} = 6{,}9\ \text{s}.$$

› 2. Modèle du circuit série

22 **1.** u_C : tension aux bornes du condensateur (en V) ; E : tension du générateur (en V) ; R : résistance électrique (en Ω) ; C : capacité (en F) et t : temps (en s).

2. a. u_C est une fonction du temps car la valeur de la tension aux bornes du condensateur varie en fonction de la variable t.

b. Lorsque $t = 0$, alors u_C est également nulle et lorsque t devient très grand, alors u_C tend vers E.

3. Cette expression correspond à une fonction croissante, il s'agit donc de la charge du condensateur.

23 *Une erreur s'est glissée à la question 4, où il faut lire :*

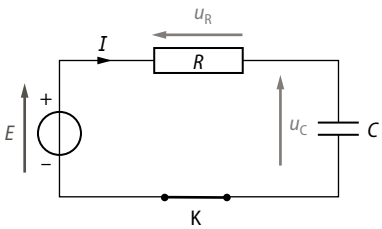
« La solution de cette équation différentielle s'écrit :

$u_C(t) = A + B \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$.

Déterminer les expressions des constantes A et B en utilisant les valeurs de u_C à l'instant initial et lorsque le condensateur est totalement chargé. »

Cette erreur a été corrigée sur le manuel de l'élève et les manuels numériques.

1.



2. a. À l'instant initial, le condensateur est déchargé. La tension à ses bornes est nulle.

b. Lorsque le condensateur est chargé, la tension à ses bornes est égale à E.

3. À chaque instant t, la loi d'additivité des tensions permet d'écrire : $E = u_C + u_R$

D'après la loi d'Ohm, on peut écrire : $u_R = R \cdot i$.

L'équation précédente devient $E = u_C + R \cdot i$

De plus, $q = C \cdot u_C$ et $i = \dfrac{dq}{dt}$, donc $i = C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$.

On en déduit que la tension u_C vérifie l'équation différentielle :

$$E = u_C + R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt} \text{ soit : } \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C = \frac{E}{R \cdot C}$$

4. À l'instant $t = 0$, la tension u_C est nulle (question **2. a.**). L'équation donnée devient :

$u_C(0) = \text{A} + \text{B} \cdot \text{e}^{-\frac{1}{R \cdot C} \times 0} = 0$, donc $\text{A} = -\text{B}$.

On a donc $u_C(t) = -\text{B} + \text{B} \cdot \text{e}^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$

Lorsque t tend vers plus l'infini, $u_C(t)$ tend vers – B et le condensateur est chargé :

$u_C(t) = E$, donc $\text{B} = -E$.

D'où $\text{A} = E$ et $\text{B} = -E$.

Finalement, $u_C(t) = E - E \cdot \text{e}^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$

5. On remplace, dans l'équation différentielle, u_C par l'expression trouvée à la question précédente :

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C$$

$$= \frac{E}{R \cdot C} \cdot \text{e}^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t} + \frac{1}{R \cdot C}\left(E - E \cdot \text{e}^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}\right) = \frac{E}{R \cdot C}$$

Cette fonction est bien solution de l'équation différentielle.

24 **1. a.** D'après la loi d'Ohm, on peut écrire : $u_R = R \cdot i$.

De plus, $q = C \cdot u_C$ et $i = \dfrac{dq}{dt}$, donc $i = C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$.

b. À chaque instant t, la loi d'additivité des tensions permet d'écrire :

$0 = u_C + u_R$

On en déduit que la tension u_C vérifie l'équation différentielle :

$0 = u_C + R \cdot C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$ soit $\dfrac{du_C}{dt} + \dfrac{1}{R \cdot C} \cdot u_C = 0$.

2.

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C = E \cdot \left(-\frac{1}{R \cdot C} \right) \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

$$= \left(\frac{-E}{R \cdot C} + \frac{E}{R \cdot C} \right) \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} = 0$$

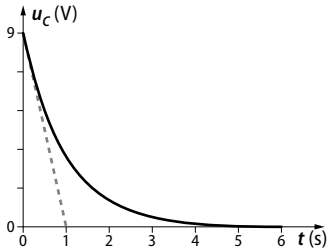
La fonction $u_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$ est bien solution de l'équation différentielle.

3. a. Quand t tend vers l'infini, u_C tend vers 0.

b. $\tau = R \cdot C = 2{,}2 \times 10^3 \times 470 \times 10^{-6} = 1{,}0$ s

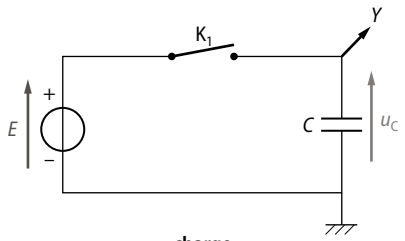
On considère qu'un condensateur est totalement déchargé au bout d'une durée : $t = 5\,\tau = 5{,}0$ s.

c.

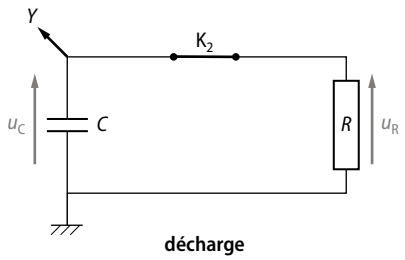


25 *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur dans les données : il faut lire $R = 330\ \Omega$ et $C = 12\ \mu F$. Cette erreur a été corrigée dans le manuel de l'élève et les manuels numériques.*

1.



charge



décharge

2. a. D'après le graphique, la tension E du générateur vaut 3 V.

b. La courbe bleue correspond à la décharge du condensateur et la courbe verte correspond à la charge.

3. a. Le temps caractéristiques correspond à l'abscisse de $0{,}63 \times E = 0{,}63 \times 3 = 1{,}9$ V. Par lecture graphique, on obtient donc que la valeur du temps caractéristique est de 4 ms.

b. On calcule :

$\tau = R \cdot C = 330 \times 12 \times 10^{-6} = 4{,}0 \times 10^{-3}$ s $= 4{,}0$ ms.

Les deux résultats sont cohérents.

Faire le point avant d'aller plus loin *p. 512*

Citer les différents éléments qui constituent un condensateur.

Un condensateur est un ensemble de deux conducteurs placés l'un en face de l'autre et séparés par un isolant. Les deux conducteurs sont appelés armatures du condensateur.

Énoncer le lien entre débit de charge et intensité du courant électrique.

L'intensité du courant électrique correspond au débit de charges électriques, c'est-à-dire à la quantité d'électricité qui traverse la surface S du conducteur par seconde.

En courant continu, l'intensité du courant I est constante ainsi que le débit de charge. En courant variable, l'intensité du courant peut varier à chaque instant : elle s'écrit comme une fonction dépendant du temps $i(t)$.

Identifier des exemples du quotidien où il y a accumulation de charges de signes opposés sur des surfaces en regard.

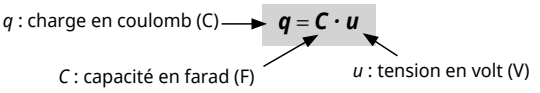
L'accumulation de charges peut s'observer dans les nuages, en approchant ses cheveux d'un écran multimédia, en approchant un doigt de la carrosserie d'une voiture un jour de grand vent, etc.

Citer des ordres de grandeur de valeurs de capacités usuelles.

Les valeurs usuelles des capacités usuelles s'expriment à l'aide des sous-multiples du farad. On peut couramment aller de quelques centaines de millifarad (10^{-6} F) au nanofarad (10^{-9} F).

Nommer les grandeurs et les unités dans la relation : $q = C \cdot u$.

q est la charge portée par les armatures d'un condensateur. Elle est proportionnelle à la tension u entre les armatures. Le coefficient de proportionnalité C est appelé capacité du condensateur et dépend des propriétés du condensateur utilisé.

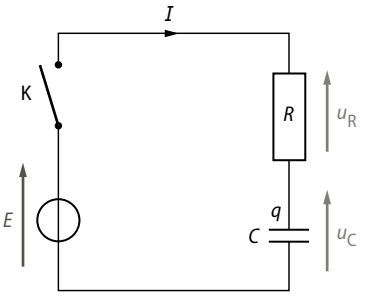


◗ ***Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs capacitifs.***

La capacité d'un condensateur dépend de plusieurs paramètres : la surface des armatures, l'épaisseur et la nature du matériau isolant entre les armatures, ce qui permet d'expliquer le fonctionnement des capteurs capacitifs. Ces dispositifs technologiques sont conçus pour réaliser la mesure de déplacement, d'épaisseur, de distance et de position. Ils fonctionnement sans contact, aussi bien avec des objets conducteurs ou isolants (voir quelques exemples p. 505 du manuel).

◗ ***Montrer que l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge s'écrit :***

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C = \frac{E}{R \cdot C}$$



D'après la loi d'additivité des tensions : $E = u_C + u_R$.

D'après la loi d'Ohm, on a $u_R = R \cdot i$, donc $E = u_C + R \cdot i$.

Or $i = \frac{dq}{dt}$ et $q = C \cdot u_C$, donc $i = \frac{d(C \cdot u_C)}{dt}$.

C étant constante ; alors $i = C \cdot \frac{du_C}{dt}$ soit :

$E = u_C + R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt}$

D'où $\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C = \frac{E}{R \cdot C}$, équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur.

◗ ***Rappeler l'expression du temps caractéristique du circuit RC série.***

Généralement noté τ, le temps caractéristique du circuit RC série est égal au produit $R \cdot C$. Il est homogène à un temps et s'exprime en seconde (s).

Exercices similaires aux exercices résolus

p. 513 et 514

27 **1.** $I = \frac{q}{\Delta t}$

2. $q = C \cdot u_C$

3. a. Le schéma indique $I = 10$ mA.

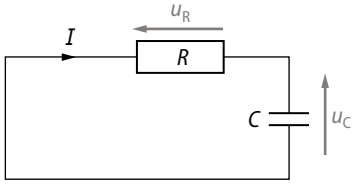
$q = I \cdot \Delta t = 10 \times 10^{-3} \times 500 \times 10^{-3} = 5{,}0 \times 10^{-3}$ C

b. Le graphique indique que pour $t = 500$ ms, $u_C = 0{,}80$ V.

Donc :

$C = \frac{q}{u_C} = \frac{5{,}0 \times 10^{-3}}{0{,}80} = 6{,}3 \times 10^{-3}$ F

29 **1.**



2. D'après la loi d'Ohm, on peut écrire : $u_R = R \cdot i$.

De plus, $q = C \cdot u_C$ et $i = \frac{dq}{dt}$, donc $i = C \cdot \frac{du_C}{dt}$.

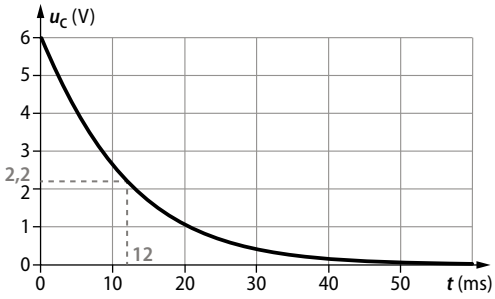
À chaque instant t, la loi d'additivité des tensions permet d'écrire :

$0 = u_C + u_R$

On en déduit que la tension u_C vérifie l'équation différentielle :

$0 = u_C + R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt}$ soit $u_C + \tau \cdot \frac{du_C}{dt} = 0$.

3. a. Le temps caractéristique correspond à l'abscisse atteinte pour 37 % de la valeur initiale, soit $6 \times 0{,}37 = 2{,}2$ V. Par lecture graphique, on obtient $\tau = 12$ ms.



b. $\tau = R \cdot C$ donc :

$C = \frac{\tau}{R} = \frac{12 \times 10^{-3}}{500} = 2{,}4 \times 10^{-5}$ F $= 24$ µF

S'entraîner pour maîtriser p. 515

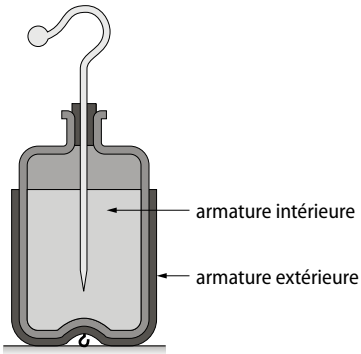
30 *Cet exercice est en bleu sur le manuel élève et corrigé pour les élèves sur le site ressources.*

1. La tension u tend vers la valeur 1 500 V lorsque t augmente. Cette valeur correspond à la tension délivrée par le générateur. C'est une tension élevée. Il faut un sol sec et non métallique.

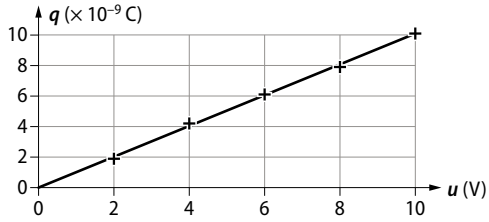
2. Le temps caractéristique correspond à l'abscisse atteinte pour 63 % de la valeur initiale, soit $1\,500 \times 0{,}63 = 9{,}5 \times 10^2$ V. Par lecture graphique, on obtient $\tau = 0{,}45$ s.

3. a. On calcule $0{,}97 \times 1\,500 = 1{,}5 \times 10^3$ V. Cette valeur est atteinte pour $\Delta t = 2{,}50$ s.
b. On a $5 \cdot \tau = 5 \times 0{,}45 = 2{,}3$ s.
Cette valeur peut être comparée à la précédente en calculant un écart relatif : on trouve un écart inférieur à 10 %.

31 **1.**



2. a.



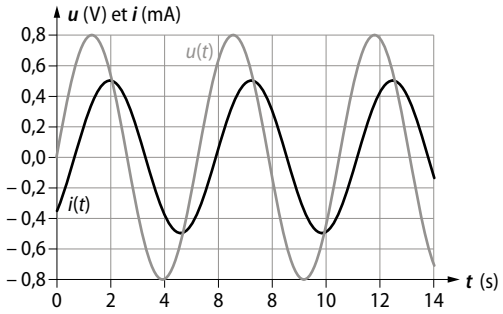
b. Les résultats expérimentaux peuvent être modélisés par une droite qui passe par l'origine. Les grandeurs q et u_C sont donc proportionnelles. On détermine le coefficient directeur de la droite :

$$a = \frac{10{,}1 \times 10^{-9}}{10{,}0} = 1{,}01 \times 10^{-9} \text{ C} \cdot \text{V}^{-1}$$

D'où $q = 1{,}01 \times 10^{-9}\, u_C$.

3. Comme $q = C \cdot u$, on peut, par identification, écrire que la capacité de la bouteille de Leyde vaut : $C = 1{,}01 \times 10^{-9}$ F

32 **1.** On obtient :

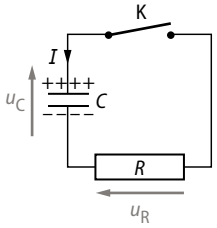


On constate que i est en retard de phase sur u. Ce dipôle n'a pas un comportement capacitif.

2. Un comportement capacitif est caractérisé par un courant en avance de phase sur la tension. Cette condition sera obtenue en modifiant la ligne 11 où le signe – dans la parenthèse sera remplacé par un signe +.

33 **1. a.** La situation précédente correspond à une accumulation de charges de signes opposés, dans deux régions de l'espace (le sol et le bas des nuages) séparées par un matériau isolant (l'air). Elle peut donc être modélisée par un condensateur, le sol et le bas des nuages représentant les armatures et l'air, l'isolant.
b. La charge globale du sol est due au phénomène d'influence électrostatique. Le bas du nuage chargé négativement va repousser les charges électriques en vis-à-vis et le sol se retrouve donc localement positif.

2.



34 **› Démarche avancée**
Voir *Démarche élémentaire*.

› Démarche élémentaire
1. $\tau = R \cdot C = 47 \times 10^3 \times 1{,}1 \times 10^3 \times 10^{-6}$
$= 52$ s

2. On considère qu'un condensateur est chargé à partir de $5\,\tau = 260$ s. L'utilisateur dispose donc d'environ quatre minutes pour désactiver l'alarme.

3. Cette durée est suffisante pour désactiver une alarme en entrant dans un logement.

35 **1.** Voir démonstration dans le corrigé de l'exercice 24, questions **1. a** et **b**.

2. $\dim \tau = \dim R \cdot \dim C = \dfrac{\dim U}{\dim I} \cdot \dfrac{\dim q}{\dim U}$

$= \dfrac{\dim q}{\dim I} = \dfrac{\mathrm{T} \cdot \mathrm{I}}{\mathrm{I}} = \mathrm{T}$

La constante τ est homogène à un temps.

3. a. La dérivée de la fonction $u_C(t)$ s'écrit :
$\dfrac{du_C}{dt} = -\dfrac{u_C}{\tau}$.
Elle vérifie bien l'équation établie précédemment.
b. Si $t = 5\tau$, alors $u(5\tau) = 3{,}6 \times e^{-5} = 0{,}02$ V, valeur proche de zéro. On peut donc considérer que le condensateur est déchargé.

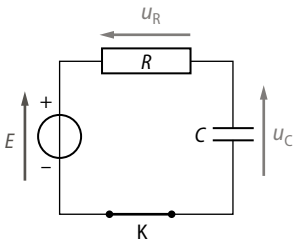
4. La durée de fonctionnement de la lampe sera inférieure à :
$5\,\tau = 5 \times 220 \times 1{,}0 = 1{,}1 \times 10^3$ s, soit environ 18 min.

36 **Exemple d'exposé oral**
Ce circuit a pour objectif d'étudier la **charge** et la décharge d'un **condensateur** dans un **circuit RC série**. On utilise comme générateur les bornes 8 et GND du microcontrôleur. La tension aux bornes du condensateur est mesurée en utilisant la borne A0 qui est une entrée analogique.
Le programme permet la charge et de la décharge du condensateur en commandant la borne 8 qui délivrera 5 V dans son état *high* et 0 V dans son état *low*. Un **temps caractéristique** de 2 s entre les deux états est prévu. Ce type de mesure permet par exemple de déterminer expérimentalement la valeur de la **capacité** du condensateur.

37 **Exemple d'exposé oral**
Le corps a une certaine capacité, ce qui signifie qu'il peut stocker une charge électrique. Si on touche l'écran d'un smartphone ou d'une tablette, des circuits électroniques à l'intérieur de l'appareil sont en mesure de détecter les charges stockées dans le doigt. Les circuits déterminent la partie de l'écran touchée et utilisent ces informations pour déterminer l'action attendue. Ce type d'écran est appelé écran tactile capacitif. Les applications technologiques fondées sur le modèle du condensateur sont très nombreuses. Il existe en particulier de nombreux types de capteurs qui exploitent le fait que la capacité dépend de plusieurs paramètres, en particulier la surface des armatures, l'épaisseur et la nature du matériau isolant entre les armatures. Ces dispositifs technologiques sont conçus pour réaliser la mesure de déplacement, d'épaisseur, de distance et de position (comme dans les accéléromètres). Ils fonctionnement sans contact, aussi bien avec des objets conducteurs qu'isolants.

Développer ses compétences p. 517

38 **› Questions préliminaires**
1. a.



b. À chaque instant t, la loi d'additivité des tensions permet d'écrire :
$E = u_C + u_R$
D'après la loi d'Ohm, on peut écrire : $u_R = R \cdot i$.
L'équation précédente devient $E = u_C + R \cdot i$.
De plus, $q = C \cdot u_C$ et $i = \dfrac{dq}{dt}$, donc $i = C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$.
On en déduit que la tension u_C vérifie l'équation différentielle :
$u_C + R \cdot C \cdot \dfrac{du_C}{dt} = E$

2. Exprimons $u_C + R \cdot C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$ avec :

$u_C(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$

$u_C + R \cdot C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$

$= E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right) + R \cdot C \cdot E \cdot \left(-\dfrac{1}{R \cdot C}\right) \cdot \left(-e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$

$= E - E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} + E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$

$= E$

L'expression littérale du temps caractéristique est :
$\tau = R \cdot C$

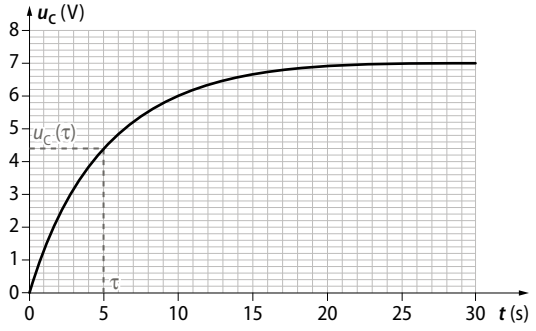
$\dim \tau = \dim R \cdot \dim C = \dfrac{\dim U}{\dim I} \cdot \dfrac{\dim q}{\dim U}$

$= \dfrac{\dim q}{\dim I} = \dfrac{\mathrm{T} \cdot \mathrm{I}}{\mathrm{I}} = \mathrm{T}$

La constante τ est homogène à un temps, son unité est donc la seconde.

› Le problème à résoudre

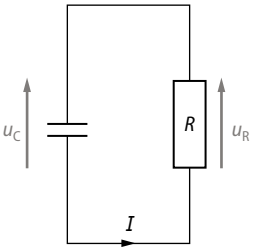
Par lecture graphique sur le doc. 3, il est possible d'évaluer la constante de temps τ car :
$u_C(\tau) = 0{,}63 \times E = 0{,}63 \times 7{,}0 = 4{,}4$ V.
Ainsi, par lecture graphique, on a $\tau = 5$ s.



Le temps de réponse du circuit, égal à 2τ, vaut donc 10 s.
C'est une durée qui paraît un peu excessive et qui risque de générer des temps d'attente significatifs lorsque de nombreux usagers montent dans le bus.

39 › Questions préliminaires

1. a.



On a : $i(t) = \dfrac{dq}{dt}$ et $q(t) = C \cdot u_C(t)$

C est constante.
La loi d'Ohm s'écrit : $u_R(t) = -R \cdot i(t)$ et la loi d'additivité des tensions :
$u_C(t) = u_R(t)$

On a donc : $i(t) = \dfrac{dq}{dt} = C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$

D'où :

$u_R(t) = -R \cdot i(t) = -R \cdot C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$

On en déduit :

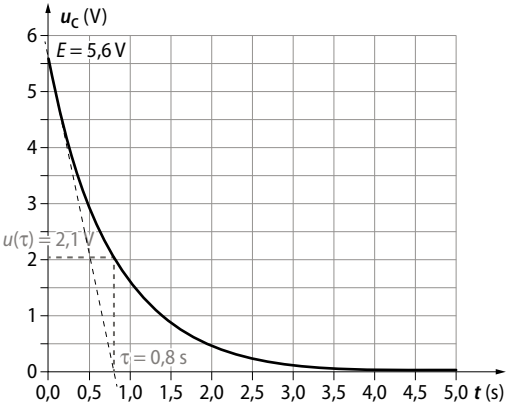
$u_C(t) = -R \cdot C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$ soit $\dfrac{du_C}{dt} + \dfrac{1}{R \cdot C} u_C = 0.$

La fonction $u_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$ est solution de cette équation différentielle.

b. $\tau = R \cdot C = 2 \times 10^6 \times 4 \times 10^{-4} \times 10^{-3} = 0{,}8$ s

2. Sur le graphique, on mesure la valeur de la tension E : $E = 5{,}6$ V.
Pour $t = \tau$, la tension aux bornes du condensateur est égale à 37 % de sa valeur initiale :
$u_C(t = \tau) = 0{,}37 \times E = 0{,}37 \times 5{,}6 = 2{,}1$ V

Sur le graphique, cette valeur de u_C correspond à une abscisse égale à $\tau = 0{,}8$ s. Ce résultat est égal à celui obtenu par le calcul de la question précédente.



› Le problème à résoudre

Si on considère qu'un cycle charge/décharge met une durée τ à se réaliser, alors la période des impulsions est $T = 0{,}80$ s.
La fréquence des impulsions est :
$f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{0{,}8} = 1{,}25$ Hz, soit $1{,}25 \times 60 = 75$ impulsions par minute. Cette fréquence cardiaque est bien comprise dans l'intervalle défini par le doc. 1.

40 › Questions préliminaires

1. a L'expression du temps caractéristique s'écrit : $\tau = R \cdot C$.

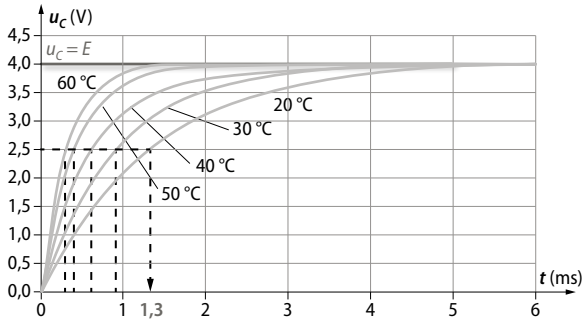
b. Lors de la charge d'un condensateur dans un circuit RC, la tension aux bornes du condensateur s'écrit : $u_C(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$.

On a donc

$u_C(\tau) = E \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{R \cdot C}}) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{R \cdot C}{R \cdot C}}\right)$

$= E \cdot (1 - e^{-1}) = 0{,}63 \times E.$

2. $u_C(\tau_{20}) = 0{,}63 \times 4{,}0 = 2{,}5$ V
Par lecture graphique, on détermine : $\tau_{20} = 1{,}3$ ms.



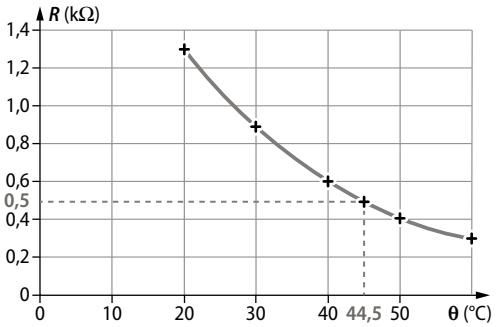
On en déduit que $R_{20} = \frac{\tau_{20}}{C} = \frac{1{,}3 \times 10^{-3}}{1{,}0 \times 10^{-6}} = 1{,}3$ kΩ, ce qui correspond au résultat attendu.

› Le problème à résoudre

On reprend le raisonnement précédent pour les différentes températures représentées dans le graphique ci-avant. On obtient les résultats suivants :

Température θ (°C)	20	30	40	50	60
Temps caractéristique τ (ms)	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3
Résistance *R* (kΩ)	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3

On représente la courbe d'étalonnage $R = f(\theta)$ et, par lecture graphique, on évalue la température correspondant à une résistance de 500 Ω. On mesure : θ = 44,5 °C.



41 **1. a.** Voir démonstration dans le corrigé de l'exercice 24, questions **1. a** et **b.**, en posant $\alpha = R \cdot C$.
b. C'est le temps caractéristique, il s'exprime donc en s.

2. $\ln(u_C) = \ln\left(E \cdot e^{-\alpha \cdot t}\right) = \ln(E) + \ln\left(e^{-\alpha \cdot t}\right)$
$= \ln(E) - \alpha \cdot t$

3. a. L'expression précédente montre que $\ln(u_C)$ en fonction de t est une fonction affine décroissante de coefficient directeur $-\alpha$ (< 0) et d'ordonnée à l'origine $\ln(E)$.

b. D'après les questions précédentes et l'équation donnée sur la figure, on a :
$\tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{45{,}5} = 2{,}2 \times 10^{-2}$ s = 22 ms.

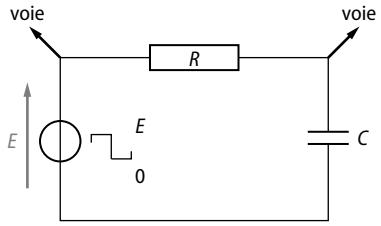
c. Si $t = 5\tau = 110$ ms, alors $u(5\tau) = 5 \times e^{-5} = 0{,}03$ V, valeur proche de zéro. On peut donc considérer que le condensateur est déchargé. On vérifie sur la première courbe que la tension s'annule bien pour $t > 110$ ms.

POUR PRÉPARER L'ECE

p. 520

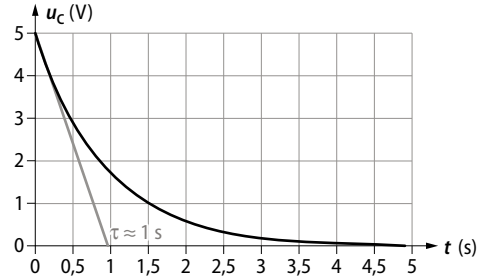
2. Charge et décharge du circuit RC

2.



3. Mesure du temps caractéristique

1. On obtient par exemple, pour la décharge, et avec un condensateur de capacité $C = 100$ µF :



On trouve τ = 1,0 s.

2. $\tau = R \cdot C$ donc :
$C = \frac{\tau}{R} = \frac{1{,}0}{10 \times 10^3} = 100$ µF
La valeur expérimentale est en accord avec la valeur donnée par le constructeur.

Manuel p. 233

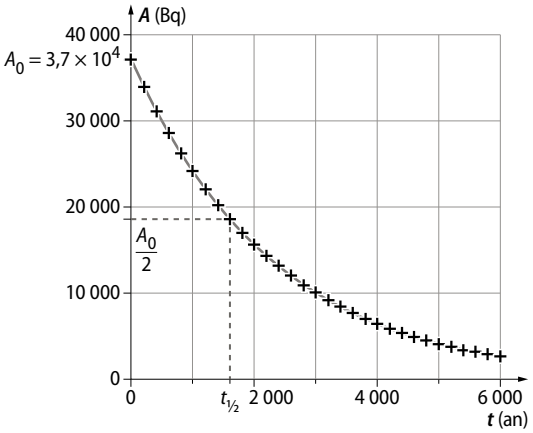
Constitution et transformations de la matière

2. UNE POTION RADIOACTIVE

1. On utilise la conservation :
– du nombre de charges : $Z + 86 = 88$, donc $Z = 2$;
– du nombre de nucléons : $A + 222 = 226$ donc $A = 4$.
$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He}$

X est donc un noyau d'hélium et il s'agit d'une radioactivité α.

2. Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents se sont désintégrés. L'activité initiale A_0 est aussi divisée par deux.



On vérifie ainsi que, pour le radium 226,
$t_{1/2} = 1{,}60 \times 10^3$ ans.

3. $A(t_{1/2}) = \dfrac{A_0}{2} = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$

$\dfrac{1}{2} = \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$

$\ln \dfrac{1}{2} = -\ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2}$

Ainsi, $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}$

$\lambda = \dfrac{\ln 2}{1{,}60 \times 10^3 \times 365{,}25 \times 24 \times 3\,600}$
$= 1{,}37 \times 10^{-11}\ \text{s}^{-1}$

4. L'activité est proportionnelle au nombre de noyaux :
$A(t) = \lambda \cdot N(t)$
D'où, à $t = 0$ s, $N_0 = \dfrac{A_0}{\lambda}$

$N_0 = \dfrac{3{,}7 \times 10^4}{1{,}37 \times 10^{-11}} = 2{,}7 \times 10^{15}$ noyaux

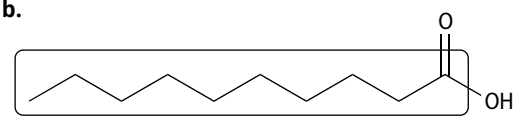
5. $m_0 = n_0 \cdot M = \dfrac{N_0}{\mathrm{N_A}} \cdot M$

$m_0 = \dfrac{2{,}7 \times 10^{15}}{6{,}02 \times 10^{23}} \times 226 = 1{,}0 \times 10^{-6}\ \text{g} = 1{,}0\ \mu\text{g}$

3. UN COMPOSANT DU LAIT

› A. Structures et propriétés acide-base de l'acide caprique

1. a. Il s'agit d'une formule topologique.
b.



2. La formule brute est $C_{10}H_{20}O_2$, donc :
$M = 12{,}0 \times 10 + 20 \times 1{,}0 + 2 \times 16{,}0 = 172\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

3. a. Un acide au sens de Brønsted est une espèce susceptible de céder un proton.
b. L'acide caprique possède un groupe carboxyle –COOH susceptible de libérer un proton : il possède donc des propriétés acide-base.
c. Il appartient au couple acide-base RCO_2H / RCO_2^-.

4. a. L'instruction demande de renseigner la valeur du pK_A du couple acide-base étudié.
b. Ligne 10 : `plt.plot(pH,b(pH),'g')` (la grandeur b correspondant au pourcentage de base est tracée en vert et en trait plein en fonction du pH).
Ligne 12 : `plt.ylabel('%')` (la légende inscrite sur l'axe des abscisses est « % »).

5. a. La courbe rouge correspond à RCO_2H et la courbe verte à RCO_2^-.

D'après la relation $pH = pK_A + \log \dfrac{[A^-\,(aq)]}{[AH\,(aq)]}$ quand $pH = pK_A$: $[RCO_2H] = [RCO_2^-]$, donc, par lecture graphique de l'abscisse du point d'intersection des deux courbes sur le doc. 2, $pK_A = 4{,}9$
b. À pH = 6, valeur supérieure à pK_A, la forme RCO_2^- prédomine.

c. $pH = pK_A + \log \dfrac{[RCO_2^-]}{[RCO_2H\,]}$

$\log \frac{[RCO_2^-]}{[RCO_2H]} = pH - pK_A = 6 - 4{,}9 = 1{,}1$

$\frac{[RCO_2^-]}{[RCO_2H]} = 10^{1,1} = 12{,}6$, valeur inférieure à 100.

On ne peut pas négliger RCO_2H devant RCO_2^-.

› B. Titrage de l'acide caprique contenu dans le lait de chèvre

1. a. RCO_2^-, espèce basique, prédomine dans ce lait. La solution titrante est l'acide chlorhydrique.
b. RCO_2^- (aq) + H_3O^+ (aq) → RCO_2H (aq) + H_2O (ℓ).

2. À l'équivalence, les quantités de matière des réactifs sont dans les proportions stœchiométriques.
On a la relation : $n(RCO_2^-)$ (aq) = $n(H_3O^+)$ (aq).

3. Avant l'équivalence, du point de vue de la conductimétrie, tout se passe comme si on remplaçait les ions RCO_2^- par les ions chlorure Cl^- de conductivité molaire ionique supérieure. La conductivité de la solution croît. Après l'équivalence, on ajoute des ions H_3O^+ ($\lambda = 34{,}96$ mS · m² · mol⁻¹) et Cl^-, la conductivité croît beaucoup plus rapidement. C'est donc la représentation 3 qui convient.

4. Quantité de matière d'ions RCO_2^- :
$n_1 = c \cdot V_E = 1{,}00 \times 10^{-2} \times 14{,}1 \times 10^{-3}$
$= 1{,}41 \times 10^{-4}$ mol
Quantité de matière d'acide caprique RCO_2H :
$n_2 = \frac{n_1}{12{,}6} = \frac{1{,}41 \times 10^{-4}}{12{,}6} = 1{,}12 \times 10^{-5}$ mol
Quantité de matière totale :
$n = n_1 + n_2 = 1{,}52 \times 10^{-4}$ mol
Masse correspondante :
$m = n \cdot M$(acide caprique) $= 1{,}52 \times 10^{-4} \times 172$
$= 2{,}61 \times 10^{-2}$ g dans 10,0 mL, soit 0,261 g dans 100 mL.
Or 100 mL de lait de vache contiennent environ 0,09 g d'acide caprique. Le lait de chèvre contient bien trois fois plus d'acide caprique que le lait de vache.

4. ESPÈCE FLUORESCENTE

› A. Propriétés acide-base de la fluorescéine

1. a. et **b.** Les valeurs des pK_A se situent aux intersections entre les domaines de chaque espèce du doc. 1.
Couples acide-base :
H_3Flu^+ / H_2Flu ; $pK_{A1} = 2{,}2$.
H_2Flu / $HFlu^-$; $pK_{A2} = 4{,}3$.
$HFlu^-$ / Flu^{2-} ; $pK_{A3} = 6{,}7$.

2. a. $FluNa_2$ (s) → Flu^{2-} (aq) + 2 Na^+ (aq)
b. D'après l'équation de dissolution totale, on a :
$n(FluNa_2) = n(Flu^{2-})$
$c = [Flu^{2-}]_0 = \frac{n(Flu^{2-})}{V} = \frac{n(FluNa_2)}{V}$
$= \frac{\frac{m(FluNa_2)}{M}}{V} = \frac{m(FluNa_2)}{M \cdot V}$
$[Flu^{2-}]_0 = \frac{1{,}00 \times 10^{-2}}{376 \times 0{,}100} = 2{,}66 \times 10^{-4}$ mol · L⁻¹

3. a. Flu^{2-} (aq) + H_2O (ℓ) ⇄ $HFlu^-$ (aq) + HO^- (aq)
b. La base Flu^{2-} gagne un proton H^+ fourni par l'acide H_2O ; il s'agit d'une réaction acide-base.

4. La réaction acide-base ci-dessus n'étant pas totale, alors une partie des ions Flu^{2-} apportés est transformée en ions $HFlu^-$ et une partie est encore sous forme Flu^{2-} :
$[Flu^{2-}]_0 = [HFlu^-]_f + [Flu^{2-}]_f$
Ainsi, $[Flu^{2-}]_f = [Flu^{2-}]_0 - [HFlu^-]_f$

5. $pH = pK_{A3} + \log \frac{[Flu^{2-}]_f}{[HFlu^-]_f}$

$\log \frac{[Flu^{2-}]_f}{[HFlu^-]_f} = pH - pK_{A3}$

$\frac{[Flu^{2-}]_f}{[HFlu^-]_f} = 10^{pH - pK_{A3}}$

$\frac{[Flu^{2-}]_0 - [HFlu^-]_f}{[HFlu^-]_f} = 10^{pH - pK_{A3}}$

$[HFlu^-]_f \cdot 10^{pH - pK_{A3}} + [HFlu^-]_f = [Flu^{2-}]_0$

$[HFlu^-]_f \cdot (10^{pH - pK_{A3}} + 1) = [Flu^{2-}]_0$

$[HFlu^-]_f = \frac{[Flu^{2-}]_0}{10^{pH - pK_{A3}} + 1}$

$[HFlu^-]_f = \frac{2{,}66 \times 10^{-4}}{10^{7{,}0 - 6{,}7} + 1} = 8{,}88 \times 10^{-5}$ mol · L⁻¹

6. Pour pH = 7,0, le diagramme de prédominance montre que $[Flu^{2-}]_f > [HFlu^-]_f$.
On peut calculer $[Flu^{2-}]_f = [Flu^{2-}]_0 - [HFlu^-]_f$:
$[Flu^{2-}]_f = 2{,}66 \times 10^{-4} - 8{,}88 \times 10^{-5}$
$= 1{,}77 \times 10^{-4}$ mol · L⁻¹
On vérifie bien que $[Flu^{2-}]_f > [HFlu^-]_f$, ce résultat est cohérent.

› B. Synthèse de la fluorescéine

1. On reconnaît les molécules d'après leurs formules brutes. La résorcine $C_6H_6O_2$ est la première molécule de l'équation et l'anhydride phtalique $C_8H_4O_3$, la seconde.

2. On détermine les quantités de matière des deux réactifs :

Résorcine :

$$n_1 = \frac{m(\text{résorcine})}{M(\text{résorcine})} = \frac{3{,}30}{110}$$
$$= 3{,}00 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

Anhydride phtalique :

$$n_2 = \frac{m(\text{anhydride})}{M(\text{anhydride})} = \frac{2{,}00}{148}$$
$$= 1{,}35 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

D'après l'équation de la réaction, il faut 1 mol d'anhydride phtalique pour consommer 2 mol de résorcine

Avec $n_2 = 1{,}35 \times 10^{-2}$ mol d'anhydride phtalique, on peut consommer $n_{rés} = 2n_2 = 2{,}70 \times 10^{-2}$ mol.

Or on dispose de $n_1 = 3{,}00 \times 10^{-2}$ mol, donc il restera de la résorcine en fin de réaction. La résorcine est bien introduite en excès.

3. Le bain d'huile est à la température $T = 180$ °C.

Pour la résorcine, $T_f = 110$ °C et $T_{éb} = 280$ °C.

Pour l'anhydride phtalique, $T_f = 131$ °C

et $T_{éb} = 284$ °C.

$T_f < T < T_{éb}$, donc les deux réactifs sont à l'état liquide.

4. L'acide sulfurique (qui apparaît au-dessus de la flèche dans l'équation de réaction) n'entre pas dans l'équation de la réaction, il s'agit d'un catalyseur dont le rôle est de réduire la durée de la transformation.

5. La réaction indique de l'eau du côté des produits. Or la température du milieu réactionnel est supérieure à 100 °C. On peut penser que les vapeurs sont essentiellement formées d'eau.

6. À la fin de l'étape ❸, on a ajouté de la soude à 1 mol · L^{-1}. Il s'agit d'une solution très basique, le pH est supérieur au pK_A du couple $HFlu^- / Flu^{2-}$, qui vaut 6,7. Ainsi, la fluorescéine est sous la forme de la base Flu^{2-}.

7. L'ajout d'acide sulfurique fait baisser fortement le pH. Ainsi, le pH doit devenir inférieur au pK_A du couple $H_2Flu / HFlu^-$, qui vaut 4,3, faisant prédominer H_2Flu dans le milieu.

H_2Flu est peu soluble dans l'eau, donc H_2Flu apparaît sous forme solide et précipite.

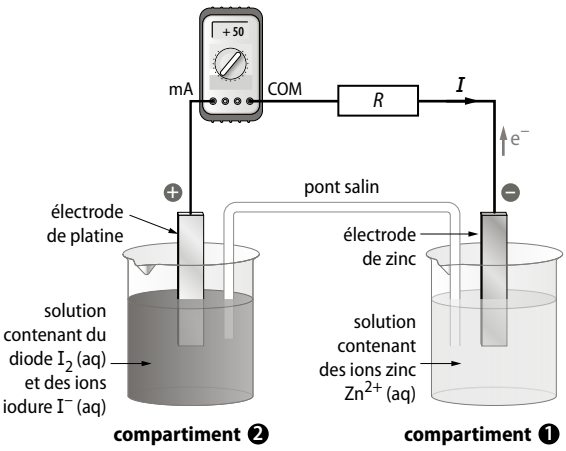
8. Le rendement est le rapport de la quantité de fluorescéine réellement obtenue par la quantité maximale de fluorescéine attendue théoriquement. L'anhydride phtalique est le réactif limitant, d'après l'équation de la réaction, il se forme autant de fluorescéine que l'on consomme d'anhydride phtalique.

$$R = \frac{n_{\text{expérimental}}}{n_{\text{maximal}}} = \frac{\frac{2{,}47}{332}}{\frac{2}{148}} = 0{,}55 = 55\ \%$$

5. ÉTUDE D'UNE PILE

› A. La pile

1. a. Une valeur positive est affichée sur l'écran de l'ampèremètre, ce qui indique que l'intensité entre par la borne « mA » et sort par la borne « COM ». Par ailleurs, le courant électrique circule du pôle « + » vers le pôle « – » à l'extérieur de la pile. À l'extérieur de la pile, les porteurs de charge sont les électrons qui circulent dans le sens opposé.



b. Au niveau de l'électrode en zinc, il se produit une oxydation qui libère des électrons :

$Zn\ (s) = Zn^{2+}(aq) + 2\ e^-$

Au niveau de l'électrode en platine, il se produit une réduction qui consomme des électrons :

$I_2\ (aq) + 2\ e^- = 2\ I^-\ (aq)$

c. L'équation de fonctionnement de la pile est :

$Zn\ (s) + I_2\ (aq) \rightarrow 2\ I^-\ (aq) + Zn^{2+}\ (aq)$

d. À l'intérieur de la pile, les porteurs de charge sont les ions.

Le pont salin permet de fermer le circuit électrique et assure la neutralité des solutions.

2. a.

$$Q_{r,i} = \frac{\left[Zn^{2+}(aq)\right]_i \cdot \left[I^-(aq)\right]_i^2}{\left[I_2(aq)\right]_i} = \frac{\left[Zn^{2+}(aq)\right]_0 \cdot \left[I^-(aq)\right]_0^2}{\left[I_2(aq)\right]_0}$$

$$Q_{r\,i} = \frac{1{,}0 \times 10^{-1} \times (5{,}0 \times 10^{-2})^2}{1{,}0 \times 10^{-1}}$$
$$= 2{,}5 \times 10^{-3}$$

b. $Q_{r,\,i} < K(T)$, la transformation va évoluer dans le sens direct.

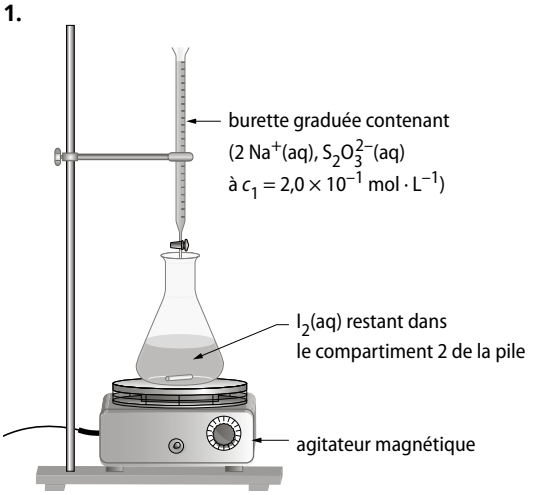
c. $$Q_r = \frac{\left[Zn^{2+}(aq)\right] \cdot \left[I^-(aq)\right]^2}{\left[I_2(aq)\right]}$$

Lorsque la pile fonctionne, la valeur du quotient de réaction augmente pour tendre vers $Q_{r,éq} = K(T)$;

la concentration en quantité de matière du diiode diminue, le diiode est bien consommé.

› B. Titrage du diiode

1.



2. À l'équivalence du titrage, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. Ils sont alors totalement consommés. La coloration brune due au diiode disparaît lorsque l'équivalence est atteinte.

3. a.

Équation de la réaction		**$2\ S_2O_3^{2-}\ (aq) + I_2\ (aq) \rightarrow S_4O_6^{2-}\ (aq) + 2\ I^-\ (aq)$**			
État du système	**Avancement** (en mol)	**Quantités de matière** (en mol)			
initial	0	n	n'	0	$n_i(I^-)$
en cours	x	$n - 2x$	$n' - x$	x	$n_i(I^-) + 2x$

b. D'après l'équation chimique du titrage, à l'équivalence :

$$n(I_2)_{conso} = \frac{n\left(S_2O_3^{2-}\right)_{versée}}{2}$$

soit $n' = \frac{n}{2} = \frac{c \cdot V_E}{2}$

$$n' = \frac{2{,}0 \times 10^{-1} \times 14{,}7 \times 10^{-3}}{2} = 1{,}5 \times 10^{-3}\ \text{mol}$$

c. $n(I_2)_{restant} = n(I_2)_{initiale} - n(I_2)_{conso}$

$n' = [I_2\,(aq)]_0 \cdot V - n(I_2)_{conso}$

$n(I_2)_{conso} = [I_2\,(aq)]_0 \cdot V - n'$

$= 1{,}0 \times 10^{-1} \times 0{,}100 - 1{,}5 \times 10^{-3}$

$= 8{,}5 \times 10^{-3}$ mol

4. a. $n(I_2)_{conso} = x' = 8{,}5 \times 10^{-3}$ mol

b. À chaque fois que la réaction a lieu (voir partie A, question 1.b), ce sont deux électrons qui circulent dans le circuit.

$n(e^-) = 2\,x'$.

c. $q = n(e^-) \cdot N_A \cdot e = 2x' \cdot N_A \cdot e$

$= 2 \times 8{,}5 \times 10^{-3} \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}$

$= 1{,}6 \times 10^3$ C

d. $q = I \cdot \Delta t$, donc :

$$\Delta t = \frac{q}{I}$$

$$\Delta t = \frac{1{,}6 \times 10^3}{50 \times 10^{-3}} = 3{,}2 \times 10^4\ \text{s} = 8{,}9\ \text{h},$$

soit environ 9 h de fonctionnement.

6. SUIVI TEMPOREL D'UNE TRANSFORMATION CHIMIQUE

› A. Étude de la transformation

1. L'atome le plus électronégatif attire davantage les électrons de la liaison, il porte une charge partielle négative ; l'autre atome porte une charge partielle positive.

On a donc :

$C^{\delta+}—Cl^{\delta-}$ et $O^{\delta-}—H^{\delta+}$

2. L'atome de carbone central du 2-chloro-2-méthylpropane est un site accepteur de doublet d'électrons, et l'atome d'oxygène de l'eau est un site donneur de doublet d'électrons.

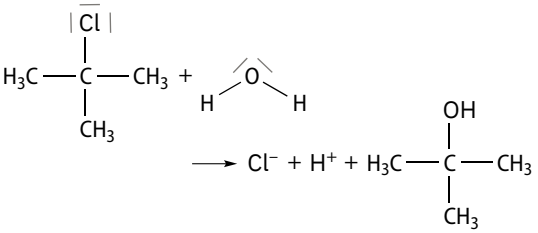
3. La molécule 1 résulte d'une réaction de substitution. En effet, l'atome de chlore du 2-chloro-2-méthylpropane a été substitué par un groupe hydroxyle —OH.

La molécule 2 résulte d'une réaction d'élimination.

4. On note sur le spectre IR la présence du groupe O—H, l'absence d'un groupe C—H avec C lié à une double liaison, la présence d'un groupe C—H avec C ayant 4 liaisons covalentes simples, et l'absence du groupe C═C.

5. La spectroscopie IR permet d'identifier la molécule 1 comme étant le produit de la réaction. Il se nomme 2-méthylpropan-2-ol et la réaction étudiée est une substitution.

6. Équation de la réaction :



Des ions apparaissant dans le milieu réactionnel, la conductivité augmente, donc la conductimétrie permet de suivre l'avancement de la réaction.

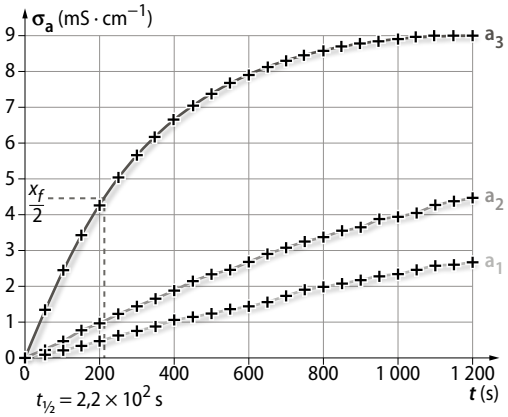
› B. Suivi temporel de l'évolution du système

1. Pour l'expérience a_3, à la date t = 1 200 s, la conductivité σ est presque constante : la transformation est terminée. Or, à cette même date, pour les expériences a_1 et a_2, la conductivité augmente encore. La durée de la transformation est plus courte pour l'expérience a_3, ainsi la vitesse volumique d'apparition du produit de la réaction est plus élevée lorsque la température est plus forte.

2. À la date t = 1 200 s, pour l'expérience b, la conductivité augmente encore. La durée de la transformation est plus courte pour l'expérience a_3, ainsi la vitesse volumique d'apparition du produit de la réaction est plus élevée lorsque la proportion d'eau par rapport à l'acétone est plus élevée.

3. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final x_f.

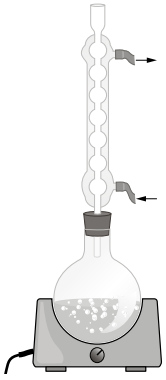
4.



7. UNE HISTOIRE DE CAFÉINE !

› A. Extraction de la caféine

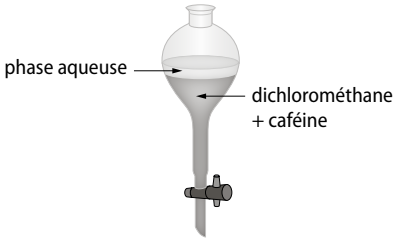
1.



L'étape ❶ est un chauffage à reflux. Le réfrigérant permet de condenser la vapeur d'eau formée lors du chauffage. L'eau redevient liquide et retombe dans le ballon, ainsi le volume du mélange réactionnel reste constant.
L'arrivée d'eau se fait toujours par la partie inférieure du réfrigérant.

2. La solubilité de la caféine augmente avec la température. Ainsi, en chauffant, on permet à la caféine de mieux se dissoudre dans l'eau.

3. On mélange la solution aqueuse et le dichlorométhane dans une ampoule à décanter.



La phase aqueuse possède une densité proche de 1, tandis que le dichlorométhane possède une densité d = 1,30. La phase supérieure est la moins dense. La phase aqueuse a été refroidie, la solubilité de la caféine est redevenue faible, tandis que la solubilité de la caféine est importante dans le dichlorométhane. Donc la caféine passe de la phase aqueuse à la phase organique (dichlorométhane).

4. Dans l'étape ❷, on procède à une extraction liquide-liquide.

5. Dans l'étape ❸, le sulfate de magnésium anhydre réagit avec l'eau éventuellement encore présente dans la phase organique. Il permet de déshydrater la phase organique.

6. On peut procéder à une recristallisation. On dissout le solide, à chaud, dans un solvant. Puis on refroidit l'ensemble : le solide précipite. On effectue ensuite une filtration sur Büchner : le solide recueilli, une fois séché, est alors plus pur.

› B. Préparation de solutions de caféine

On procède à une dilution de la solution mère (c_{m0} = 32 mg · L^{-1}, V_0 à prélever) pour préparer la solution fille (c_{m1} = 16 mg · L^{-1}, V_1 obtenu).
Au cours de la dilution, la masse de caféine se conserve, donc $m_0 = m_1$ soit :

$c_{m0} \cdot V_0 = c_{m1} \cdot V_1$

D'où $V_0 = \dfrac{c_{m1} \cdot V_1}{c_{m0}}$.

$V_0 = \dfrac{16}{32} \times V_1 = 0{,}50\ V_1$

Les volumes doivent être mesurés précisément à l'aide de verrerie jaugée. On prélève à l'aide d'une pipette jaugée 5,0 mL de la solution mère et on effectue la dilution dans une fiole jaugée de volume V_1 = 10,0 mL.

› C. Mesures d'absorbance

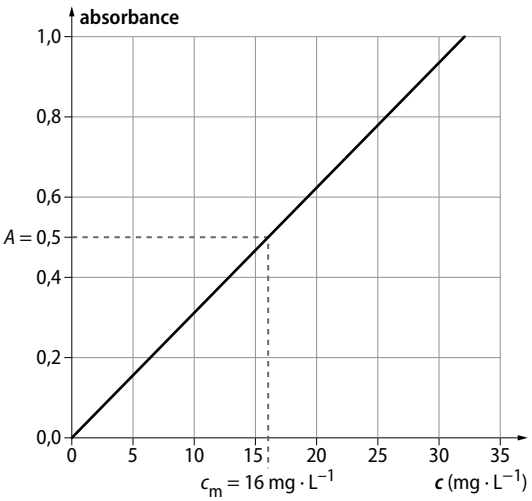
1. Il faut régler le spectrophotomètre sur la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption de la caféine, soit à $\lambda = 271$ nm.

2. La caféine absorbe entre 220 nm et 320 nm soit pour une longueur d'onde située dans le domaine des ultraviolets ($\lambda < 380$ nm). Un spectrophotomètre UV-visible est donc utilisable.

3. La molécule de caféine n'absorbe pas dans le domaine visible ; elle n'est donc pas colorée.

4. Sur la figure du doc. 5, on constate que la représentation graphique de l'absorbance en fonction de la concentration est une droite passant par l'origine. Ce qui indique que A est proportionnelle à c.
À $\lambda = 271$ nm, la boisson **b** absorbe davantage la lumière que la boisson **a** ($0{,}53 > 0{,}17$), elle est donc plus concentrée en caféine. Le thé contenu dans la tasse **b** sera plus excitant que celui de la tasse **a**.

5. Sur le spectre du doc. 4, pour $\lambda = 271$ nm, on lit $A = 0{,}5$. À l'aide de la courbe du doc. 5, on en déduit la concentration en masse de la solution qui a servi à tracer le spectre d'absorption : $c_m = 16$ mg · L^{-1}.

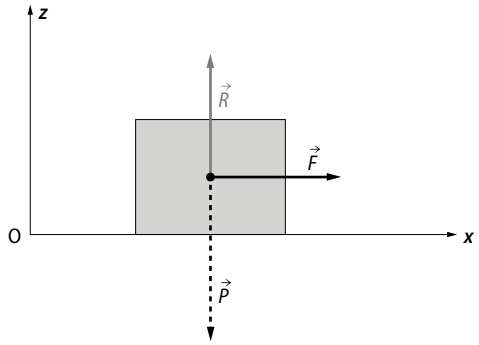


Manuel p. 365

Mouvement et interactions

2. LE CURLING

1. a. Le système d'étude est le palet de masse m
Le mouvement du palet sera étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen.
Les actions mécaniques qui s'exercent sur le palet sont :
– l'action de la Terre, que l'on modélise par le poids $\vec{P}$;
– l'action du sol, que l'on modélise par la réaction $\vec{R}$;
– l'action du joueur, que l'on modélise par la force $\vec{F}$;



D'après la seconde loi de Newton :
$m \cdot \vec{a} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F}$
Le poids $\vec{P}$ et la réaction $\vec{R}$ se compensent, donc :
$m \cdot \vec{a} = \vec{F}$
Comme $\vec{F}$ est constante, $\vec{a}$ l'est aussi, donc le mouvement est uniformément accéléré.

b. $a = \dfrac{F}{m}$ donc $v = \dfrac{F}{m} \cdot t + v_0$.

À $t = 0$, $v = 0$, donc $v_0 = 0$.

On en déduit que $v = \dfrac{F}{m} \cdot t$.

À $t = t_L = 3{,}0$ s, $v = v_L = 2{,}1$ m · s^{-1}.

Donc $v_L = \dfrac{F}{m} \cdot t_L = a \cdot t_L$.

Donc $a = \dfrac{v_L}{t_L}$.

AN : $a = \dfrac{2{,}1}{3{,}0} = 0{,}7$ m · s^{-2}

c. $F = m \cdot a$
$F = 20 \times 0{,}7 = 14$ N

d. Pour $t > 3{,}0$ s, $m \cdot \vec{a} = \vec{P} + \vec{R}$. Le poids $\vec{P}$ et la réaction $\vec{R}$ se compensent.
Donc $m \cdot \vec{a} = \vec{0}$ et $\vec{a} = \vec{0}$. Le mouvement est donc rectiligne uniforme.

2. a. $\vec{P}$ et $\vec{R}$ sont perpendiculaires au déplacement, leur travail est donc nul, seule la force de frottement $\vec{f}$ travaille. On applique le théorème de l'énergie cinétique entre l'instant où la vitesse est égale à v_L et l'instant où la vitesse est nulle :
$\Delta E_c = W(\vec{f})$

Donc $0 - \dfrac{1}{2} m \cdot v_L^2 = -f \cdot d$.

Donc $f = \dfrac{m \cdot v_L^2}{2 \cdot d}$.

AN : $f = \dfrac{20 \times 2{,}1^2}{2 \times 40} = 1{,}1$ N

b. D'après la deuxième loi de Newton :
$m \cdot \vec{a} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F'} + \vec{f}$.
Le poids $\vec{P}$ et la réaction $\vec{R}$ se compensent, donc :
$m \cdot \vec{a} = \vec{F'} + \vec{f}$
On projette selon l'axe (Ox) :
$m \cdot a = F' - f$, donc $F' = m \cdot a + f$.
La valeur de l'accélération est la même qu'en **1.** (même variation de vitesse pendant la même durée).
AN : $F' = 20 \times 0{,}7 + 1{,}1 = 15{,}1$ N

3. DESCENTE EN SNOWBOARD

› 1. Vitesse et accélération

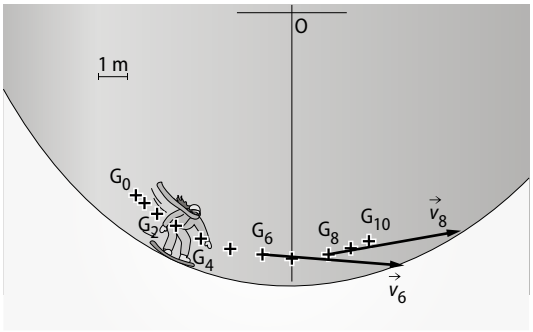
1. a. À l'aide de mesures de distances sur la chronophotographie en tenant compte de l'échelle, on en déduit que :

$v_6 = \dfrac{G_5G_7}{2\tau} = \dfrac{1{,}6}{2 \times 0{,}16} = 5{,}0$ m · s^{-1}

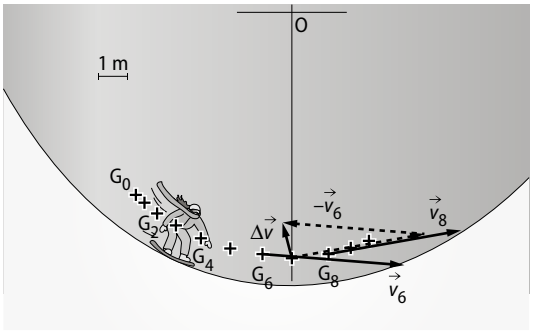
$v_7 = \dfrac{G_6G_8}{2\tau} = \dfrac{1{,}6}{2 \times 0{,}16} = 5{,}0$ m · s^{-1}

$v_8 = \dfrac{G_7G_9}{2\tau} = \dfrac{1{,}5}{2 \times 0{,}16} = 4{,}7$ m · s^{-1}

b. On choisit une échelle et on trace les vecteurs à l'échelle de telle sorte qu'ils soient tangents à la trajectoire et orientés dans le sens du mouvement :



2. On construit, avec l'origine au point G_7, le vecteur $\Delta\vec{v} = \vec{v}_8 - \vec{v}_6$.

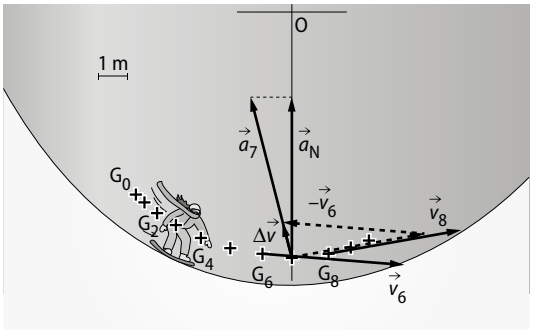


On peut ainsi déterminer, à l'aide de l'échelle choisie, que $\Delta v = 1{,}7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. $a_7 = \dfrac{\Delta v}{2\tau} = \dfrac{1{,}7}{2 \times 0{,}16} = 5{,}3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

On choisit une échelle pour l'accélération et on trace le vecteur $\vec{a}_7$ de telle sorte qu'il soit colinéaire à $\Delta\vec{v}$ (voir schéma ci-dessous).

4. a. En utilisant la construction, on peut déterminer la valeur a_N de la composante normale du vecteur accélération $\vec{a}_7$.



On peut ainsi déterminer, à l'aide de l'échelle choisie, que $a_{N_{mes}} = 5{,}2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

L'incertitude-type associée au résultat peut être estimée à $u(a_{N_{mes}}) = 0{,}2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

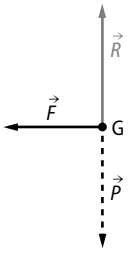
b. Pour un mouvement circulaire dans le repère de Frenet :

$$a_{N_{th}} = \frac{v_7^2}{R} = \frac{5{,}0^2}{4{,}5} = 5{,}6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\frac{\left|a_{N_{mes}} - a_{N_{th}}\right|}{u(a_{N_{mes}})} = \frac{5{,}6 - 5{,}2}{0{,}2} = 2$$

› 2. Forces de frottement

1. Système : snowboardeuse.
Référentiel : terrestre supposé galiléen.
Bilan des forces qui modélisent les actions mécaniques :
• poids de la surfeuse $\vec{P}$;
• réaction du sol $\vec{R}$;
• force de frottements : $\vec{F}$;



2. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à la snowboardeuse entre D et E, on peut écrire que :

$E_c(E) - E_c(D) = W(\vec{P}) + W(\vec{R}) + W(\vec{F})$

$W(\vec{P}) = W(\vec{R}) = 0$, car les forces considérées sont perpendiculaires au mouvement.

$E_c(E) = 0$, car la snowboardeuse s'immobilise en E, donc :

$-(1/2)m \cdot v_D^2 = -F \cdot DE$

On en déduit que :

$$F = \frac{m \cdot v_D^2}{2DE} = \frac{60 \times 4{,}6^2}{2 \times 15} = 42 \text{ N}$$

› 3. Étude énergétique

À $t = 0$ s, la vitesse de la snowboardeuse est nulle et son altitude maximale, donc à $t = 0$ s, son énergie cinétique E_c est nulle et son énergie potentielle de pesanteur E_p est maximale.

Par définition, l'énergie mécanique est telle que : $E_m = E_c + E_p$.

Donc :

la courbe A est associée à l'énergie potentielle (elle passe par un maximum en $t = 0$ s) ;

la courbe B est associée à l'énergie mécanique (elle est à chaque instant la somme de la courbe A et de la courbe C) ;

la courbe C est associée à l'énergie cinétique (elle passe par l'origine en $t = 0$ s).

4. LANCER DE « POIDS »

› 1. Choix d'un modèle

$R = (1/2) \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2$
$= (1/2) \times 1{,}29 \times 0{,}50 \times 1{,}13 \times 10^{-2} \times 10^2$
$= 0{,}36$ N

$P = m \cdot g = 7{,}26 \times 9{,}8 = 71$ N

$P \gg R$. On peut donc négliger la résistance de l'air vis-à-vis de la force de pesanteur agissant sur le « poids ».

› 2. Étude du mouvement

1. a. Système : « poids ».
Référentiel : terrestre supposé galiléen.
D'après la 2e loi de Newton appliquée au niveau du centre de masse du « poids », on peut écrire que : $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}$.
En projetant dans le repère $(O ; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$:
$a_x(t) = 0$;
$a_y(t) = 0$;
$a_z(t) = -g$.
En intégrant et en tenant compte des conditions initiales :
$v_x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha$;
$v_y(t) = 0$;
$v_z(t) = -g \cdot t + v_0 \cdot \sin\alpha$.
En intégrant une nouvelle fois, on obtient les équations horaires du mouvement :
$x(t) = (v_0 \cdot \cos\alpha) \cdot t$;
$y(t) = 0$;
$z(t) = -(1/2) \cdot g \cdot t^2 + (v_0 \cdot \sin\alpha) \cdot t + h$.

b. Dans le repère $(O ; \vec{i}, \vec{k})$, on détermine l'équation cartésienne $z(x)$ de la trajectoire en éliminant le temps :

$x = (v_0 \cdot \cos\alpha) \cdot t$, donc $t = \dfrac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}$.

On en déduit que :

$$z = -(1/2) \cdot g \cdot t^2 + (v_0 \cdot \sin\alpha) \cdot t + h$$
$$= -(1/2) \cdot g \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha} \right)^2 + (v_0 \cdot \sin\alpha) \cdot \frac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha} + h$$

Donc :

$$z = \frac{-(1/2) \cdot g}{v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \cdot x^2 + x \cdot \tan\alpha + h$$

c. La trajectoire est parabolique.

2. On connaît les coordonnées du point de chute du « poids » : $M(x_M ; 0 ; 0)$.

$$x_M = d - \text{BO} - \frac{D}{2} = 23{,}12 - 0{,}35 - \frac{2{,}14}{2}$$
$$= 21{,}7 \text{ m}$$

$$0 = \frac{-(1/2) \cdot g}{v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \cdot x_M^2 + x_M \cdot \tan\alpha + h$$

Donc :

$$\frac{(1/2) \cdot g}{v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \cdot x_M^2 = x_M \cdot \tan\alpha + h$$

$$v_0^2 = \frac{\frac{1}{2} \cdot g \cdot x_M^2}{\cos^2\alpha \cdot (x_M \cdot \tan\alpha + h)}$$

AN : $v_0^2 = \dfrac{\frac{1}{2} \times 9{,}8 \times 21{,}7^2}{\cos^2 45° \times (21{,}7 \times \tan 45° + 2)}$

$v_0 = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
On retrouve bien la valeur proposée dans l'énoncé.

3. a. On détermine la durée t_M du déplacement du « poids » entre A et M :

$$t_M = \frac{x_M}{v_0 \cdot \cos\alpha}$$

AN : $t_M = \dfrac{21{,}7}{14 \times \cos 45°} = 2{,}2$ s

b. On en déduit la valeur v_M de la vitesse au moment du contact avec le sol :
$v_M^2 = v_{Mx}^2 + v_{My}^2 + v_{Mz}^2$
$v_M^2 = v_0^2 \cdot \cos^2\alpha + 0 + (-g \cdot t_M + v_0 \cdot \sin\alpha)^2$
$v_M^2 = v_0^2 \cdot \cos^2\alpha + (g \cdot t_M)^2 + v_0^2 \cdot \sin^2\alpha - 2g \cdot t_M \cdot v_0 \cdot \sin\alpha$
$v_M^2 = v_0^2 + (g \cdot t_M)^2 - 2g \cdot t_M \cdot v_0 \cdot \sin\alpha$
AN : $v_M^2 = 14^2 + (9{,}8 \times 2{,}2)^2 - 2 \times 9{,}8 \times 2{,}2 \times 14 \times \sin 45°$
$v_M = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

4. ❶ :
```
return v0*np.cos(alpha)*t
def z(t,g,h,v0,alpha)
return h+v0*np.sin(alpha)*t-g*t**2/2
```
❷ : `2.00`
❸ : `14`
❹ : `180`
❺ : `2.2`

› 3. Aspect énergétique

1. On détermine l'énergie cinétique fournie par l'athlète au « poids » au moment du lancer :
$E_{c0} = (1/2)m \cdot v_0^2 = (1/2) \times 7{,}26 \times 14^2 = 710$ J

2. a. Au moment du lancer : $E_m = E_{c0} + m \cdot g \cdot h$.
b. En l'absence de force de dissipation, il y a conservation de l'énergie mécanique.
Donc :
$E_m = (1/2)m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = (1/2)m \cdot v_M^2$
Donc $v_M^2 = v_0^2 + 2g \cdot h$

AN : $v_M^2 = 14^2 + 2 \times 9{,}8 \times 2{,}00$
Donc $v_M = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
Le résultat est parfaitement cohérent avec celui trouvé à la question **3.** de la partie 2.

5. SATELLITES DE JUPITER

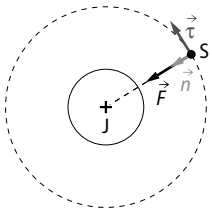
› 1. Mouvement des satellites

1. Le référentiel d'étude est le référentiel qui a pour origine le centre de masse de Jupiter et dont les axes sont orientés vers trois étoiles lointaines. On parle de référentiel « jupiterocentrique ».

• Système : satellite de Jupiter.

• Bilan des forces appliquées au système : $\vec{F}$, force gravitationnelle de Jupiter, dirigée du centre de masse du satellite vers le centre de masse de Jupiter.

D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système, on peut écrire : $m \cdot \vec{a} = \vec{F}$.



On se place dans le repère de Frenet. On peut donc écrire :

$m \cdot (a_\tau \cdot \vec{\tau} + a_n \cdot \vec{n}) = F \cdot \vec{n}$

Donc l'accélération tangentielle est nulle : $a_\tau = 0$.

D'où $\frac{dv}{dt} = 0$ et v = constante.

La vitesse est constante, donc le mouvement est uniforme.

2. On a $m \cdot a_n = F$, donc :

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{G \cdot M_J \cdot m}{r^2}$$

avec m masse du satellite, M_J masse de Jupiter, r rayon de l'orbite circulaire.

Donc $v^2 = \frac{G \cdot M_J}{r}$.

La période T du satellite est par définition le temps que met le satellite pour faire un tour complet sur son orbite. On peut donc écrire :

$v = \frac{2\pi r}{T}$

Donc $T = 2\pi \cdot \frac{r}{v} = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M_J}}$

› 2. Troisième loi de Kepler

1. D'après la question 2 de la première partie, $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_J}$.

2. On vérifie numériquement que les 4 satellites de Jupiter obéissent à cette loi, après avoir converti les périodes sidérales en s et les rayons des orbites en m.

Io : $\frac{T^2}{r^3} = \frac{(1{,}53 \times 10^6)^2}{(4{,}22 \times 10^8)^3} = 3{,}11 \times 10^{-16}$

Europe : $\frac{T^2}{r^3} = \frac{(3{,}07 \times 10^6)^2}{(6{,}71 \times 10^8)^3} = 3{,}11 \times 10^{-16}$

Ganymède : $\frac{T^2}{r^3} = \frac{(6{,}18 \times 10^6)^2}{(1{,}07 \times 10^9)^3} = 3{,}12 \times 10^{-16}$

Callisto : $\frac{T^2}{r^3} = \frac{(1{,}44 \times 10^7)^2}{(1{,}88 \times 10^9)^3} = 3{,}13 \times 10^{-16}$

3. Il y a 3 lignes de programme à réécrire pour adapter le programme aux satellites de Jupiter : ce sont les lignes 4 à 6.

	Io	Europe	Ganymède	Callisto
r (km)	422 000	671 000	1 070 000	1 880 000
r (UA)	0,00281	0,00477	0,00713	0,0125
T (jour)	1,769	3,551	7,155	16,69
T (année)	0,00485	0,00973	0,0196	0,0457

On écrira :

```
LIST_a=[0.00281,0.00447,0.00713,0.0125]
LIST_T=[0.00485,0.00973,0.0196,0.0457]
LIST_P=['Io','Europe','Ganymède','Callisto']
```

4. Comme $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$, on en déduit que :

$M = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{r^3}{T^2}$

AN : $M = \frac{4\pi^2}{6{,}67 \times 10^{-11}} \times \frac{1}{3{,}11 \times 10^{-16}}$

$M = 1{,}90 \times 10^{27}$ kg

› 3. Aspect énergétique

1. $E_m = E_c + E_p$

E_c = constante car le mouvement est uniforme (d'après la question **1.** de la 1re partie).

E_p = constante car le mouvement est circulaire ($h = r$ = constante).

Donc E_m = constante.

2. $E_m = E_c + E_p$

$$= (1/2)m \cdot v^2 - \frac{G \cdot M_J \cdot m}{r}$$

$$= (1/2)m \cdot \frac{G \cdot M_J}{r} - \frac{G \cdot M_J \cdot m}{r}$$

$$= -(1/2)m \cdot \frac{G \cdot M_J}{r}$$

6. PARTICULES EN MOUVEMENT DANS UN CHAMP

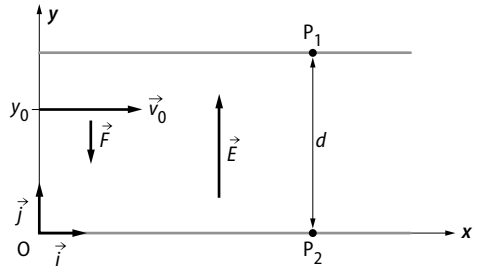
› 1. Déviation d'un faisceau d'électrons dans un champ électrique uniforme

1. a. $E = \dfrac{U}{d} = \dfrac{205}{0{,}040} = 5\,125 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$

b. Force de pesanteur :
$P = m \cdot g = 9{,}1 \times 10^{-31} \times 9{,}81$
$= 8{,}9 \times 10^{-30}$ N
Force électrique :
$F = \text{e} \cdot E = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 5\,125$
$= 8{,}2 \times 10^{-16}$ N
$\dfrac{F}{P} = 9{,}2 \times 10^{13} \gg 1$. On peut donc négliger la force de pesanteur.

2. On applique la deuxième loi de Newton au système qu'est l'électron dans le référentiel terrestre supposé galiléen :
$m \cdot \vec{a}_1 = \vec{F} = q \cdot \vec{E} = -\text{e} \cdot \vec{E}$
Donc $\vec{a}_1 = -\dfrac{\text{e}}{m} \cdot \vec{E}$.

3. a.



b. Le champ électrique est dirigé vers les charges négatives donc P_1 est chargée négativement et P_2 est chargée positivement.

3. a. $\vec{a}_1 = -\dfrac{\text{e}}{m} \cdot \vec{E}$
Donc, dans le repère $(O ; \vec{i}, \vec{j})$, on a :
$a_{1X} = 0$;
$a_{1Y} = -\dfrac{\text{e} \cdot E}{m}$.

b. On en déduit que :
$v_{1X} = \text{cste} = v_0$;
$v_{1Y} = -\dfrac{\text{e} \cdot E}{m} \cdot t$.

On en déduit les équations horaires du mouvement de la particule dans ce repère :
$x = v_0 \cdot t$;
$y = -\dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{\text{e} \cdot E}{m} \cdot t^2 + y_0$.

c. *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur. L'équation de la trajectoire est de la forme* $y = A_1 \cdot x^2 + B_1$. *Cette erreur a été corrigée dans le manuel de l'élève et les manuels numériques.*

$x = v_0 \cdot t$, donc $t = \dfrac{x}{v_0}$.

On en déduit que :
$y = -\dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{\text{e} \cdot E}{m} \cdot \left(\dfrac{x}{v_0}\right)^2 + y_0$

L'équation de la trajectoire est de la forme :
$y = A_1 \cdot x^2 + B_1$ avec :
$A_1 = -\dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{\text{e} \cdot E}{m \cdot v_0^2}$ et $B_1 = y_0$.

d. Il s'agit d'une trajectoire parabolique.

e. $a_1 = \dfrac{\text{e} \cdot E}{m}$, d'où $A_1 = -\dfrac{a_1}{2v_0^2}$.

f. $A_1 = -\dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{\text{e} \cdot E}{m \cdot v_0^2}$
Donc :
$A_1 = -\dfrac{1}{2} \times \dfrac{1{,}6 \times 10^{-19} \times 5\,125}{9{,}1 \times 10^{-31} \times (1{,}5 \times 10^7)^2}$
$= -2 \text{ m}^{-1}$

› 2. Mouvement d'une bille lancée horizontalement dans un champ de pesanteur

1. Les actions dues à l'air sur la bille sont les forces de frottement et la poussée d'Archimède.

2. On applique la deuxième loi de Newton au système qu'est la bille dans le référentiel terrestre supposé galiléen :
$M \cdot \vec{a}_2 = M \cdot \vec{g}$ (l'action de la Terre sur la bille est la seule action qui agit sur la bille).
Donc $\vec{a}_2 = \vec{g}$, vertical, orienté vers le bas et de norme égale à $g = 9{,}81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

3. a. *Une erreur s'est glissée dans le spécimen du professeur. L'équation de la trajectoire est de la forme* $y = A_2 \cdot x^2 + B_2$. *Cette erreur a été corrigée dans le manuel de l'élève et les manuels numériques.*

$\vec{a}_2 = \vec{g}$. Donc dans le repère $(O ; \vec{i}, \vec{j})$, on a :
$a_{2x} = 0$;
$a_{2y} = -g$.
On en déduit que :
$v_{2x} = \text{cste} = v_0$;
$v_{2y} = -g \cdot t$.

On en déduit les équations horaires du mouvement de la bille dans ce repère :
$x = v_0 \cdot t$
$y = -(1/2) \cdot g \cdot t^2 + y_0$
$x = v_0 \cdot t$ donc $t = \dfrac{x}{v_0}$.
On en déduit que : $y = -(1/2) \cdot g \cdot \left(\dfrac{x}{v_0}\right)^2 + y_0$

L'équation de la trajectoire est de la forme $y = A_2 \cdot x^2 + B_2$ avec :

$A_2 = -(1/2) \cdot \frac{g}{v_0^2} = -\frac{a_2}{2v_0^2}$

$B_2 = y_0$

b. $A_2 = -(1/2) \cdot \frac{g}{v_0^2} = -\frac{9{,}81}{2 \times 14{,}0^2}$

$= -0{,}025 \text{ m}^{-1}$

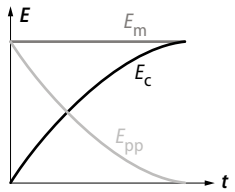
4. Lorsque la bille touche le sol :
$x = x_s$ et $y = 0$.
Donc : $0 = A_2 \cdot x_S^2 + y_0$

Donc : $A_2 = -\frac{y_0}{x_S^2} = -\frac{1{,}5}{7{,}75^2}$

$= -0{,}025 \text{ m}^{-1}$

On retrouve la valeur précédente.

5.



› 3. Comparaison des mouvements de ces deux corps

1. Les deux trajectoires sont des paraboles dont le sommet est le point de lancement.

2. La force électrique est indépendante de la masse de la particule. Le poids est proportionnel à la masse de la bille. a_1 est inversement proportionnelle à la masse de la particule. a_2 est indépendante de la masse de la bille (et égale à l'intensité de pesanteur).

7. FONTAINE AVEC SON JET D'EAU

› 1. Dégagement d'une pierre obstruant l'ouverture du jet

a. La valeur de la force F modélisant l'action mécanique qui doit s'exercer sur la pierre pour qu'elle soit dégagée doit être légèrement supérieure à celle du poids de la pierre :

$F > F_{min} = P = m \cdot g$

$= 1{,}5 \times 9{,}80$

$= 14{,}7 \text{ N}$

b. La section du « jet-réducteur » est égale à :
$S = \pi \cdot r_2^2 = \pi \times (55{,}0 \times 10^{-3})^2$
La valeur de la pression P_C correspondant à la sortie du jet est :

$P_C = \frac{F_{min}}{S} + P_0 = \frac{F_{min}}{\pi \cdot r^2} + P_0$

$P_c = \frac{14{,}7}{\pi \times (55{,}0 \times 10^{-3})^2} + 1{,}00 \times 10^5$

$= 1{,}0155 \times 10^5 \text{ Pa}$

c. En appliquant la loi fondamentale de la statique des fluides, on peut écrire que :
$P_C - P_A = \rho \cdot g \cdot (z_A - z_C) = \rho \cdot g \cdot H$
Donc :
$P_C - P_0 = \rho_{eau} \cdot g \cdot H_{min}$
Donc :

$H_{min} = \frac{P_C - P_0}{\rho_{eau} \cdot g} = \frac{1{,}0155 \times 10^5 - 1{,}00 \times 10^5}{1{,}00 \times 10^3 \times 9{,}80}$

$= 0{,}158 \text{ m}$

Donc la pierre sera dégagée avec une hauteur minimale de 16 cm.
$H_{min} < H$, donc la pierre peut être dégagée.

› 2. Débit volumique du jet et conséquence

a. En appliquant l'équation de Bernoulli entre les points A et C sur une même ligne de courant, on peut écrire :

$\frac{1}{2} \cdot \rho_{eau} \cdot v_A^2 + \rho_{eau} \cdot g \cdot z_A + P_A = \frac{1}{2} \cdot \rho_{eau} \cdot v_C^2 + \rho_{eau} \cdot g \cdot z_C + P_C$

Le réservoir est à l'air libre : $P_A = P_0$.
Son niveau peut être considéré comme constant : $z_A = \text{cste}$ et $v_A = 0$.
L'eau jaillit en C à l'air libre donc : $P_C = P_0$.
Donc on peut écrire que :

$\rho_{eau} \cdot g \cdot z_A = \frac{1}{2} \cdot \rho_{eau} \cdot v_C^2 + \rho_{eau} \cdot g \cdot z_C$

D'où : $\frac{1}{2} \cdot v_C^2 = g \cdot (z_A - z_C)$

$v_C = \sqrt{2g(z_A - z_C)}$

Donc :
$v_2 = v_C = \sqrt{2 \times 9{,}80 \times 15{,}0}$

$= 17{,}1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

b. En utilisant la conservation du débit volumique, on peut écrire, en régime permanent, le long d'une ligne de courant, que $Q_1 = Q_2$ donc $v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$.
D'où :

$v_1 = v_2 \cdot \frac{S_2}{S_1} = v_2 \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} = v_2 \cdot \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$

AN : $v_1 = 17{,}1 \times \left(\frac{55{,}0}{450}\right)^2 = 0{,}255 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

c. Le débit volumique Q_v du jet est :
$Q_v = v_2 \cdot (\pi \cdot r_2^2) = 17{,}1 \times \pi \times (55{,}0 \times 10^{-3})^2$

$= 0{,}163 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

d. $Q_v = \frac{V}{\Delta t}$, donc :

$\Delta t = \dfrac{V}{Q_v} = \dfrac{40}{0{,}163} = 246 \text{ s} = 4 \text{ min et } 6 \text{ s}$

› 3. Trajectoire du jet d'eau

1. a. En C, $z_c = 0$.
Donc $E_{mC} = E_{cC} + E_{ppC} = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$.
En D, $v_D = 0$.
Donc $E_{mD} = E_{cD} + E_{ppD} = m \cdot g \cdot h$.

b. En absence de frottements, on peut écrire que $E_{mD} = E_{mC}$.

Donc $m \cdot g \cdot h = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$.

Donc $h = \dfrac{v_0^2}{2g} = \dfrac{17{,}1^2}{2 \times 9{,}8} = 14{,}9$ m.

En réalité, le jet n'atteint pas cette hauteur en raison des frottements.

2. a. Les actions mécaniques qui agissent sur une goutte sont modélisées par les forces suivantes :
– la poussée d'Archimède,
de valeur $\pi = \rho_{air} \cdot V_{goutte} \cdot g$;
– le poids : $P = m \cdot g = \rho_{eau} \cdot V_{goutte} \cdot g$.
On néglige les frottements (d'après l'énoncé).

$$\frac{P}{\pi} = \frac{\rho_{eau} \cdot V_{goutte} \cdot g}{\rho_{air} \cdot V_{goutte} \cdot g} = \frac{\rho_{eau}}{\rho_{air}} = \frac{1{,}00 \times 10^3}{1{,}22}$$

$\dfrac{P}{\pi} \gg 1$, donc on peut négliger la poussée d'Archimède.

b. Dans le repère (C ; x, z), on utilise la deuxième loi de Newton (en considérant le référentiel terrestre comme galiléen) :
$a_x = 0$;
$a_z = -g$.
Donc :
$v_x = v_0 \cdot \sin \alpha$;
$v_z = -g \cdot t + v_0 \cdot \cos \alpha$.
Donc :
$x = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t$
$z = -(1/2) \cdot g \cdot t^2 + v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$

c. $x = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t$, donc $t = \dfrac{x}{v_0 \cdot \sin \alpha}$.
D'où :

$$z = -(1/2) \cdot g \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \sin \alpha} \right)^2 + v_0 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{x}{v_0 \cdot \sin \alpha}$$

Donc : $z = -(1/2) \cdot g \cdot \dfrac{x^2}{(v_0 \cdot \sin \alpha)^2} + \dfrac{x}{\tan \alpha}$

d. Pour $x = x_m$, on a $z = 0$.

$$\text{Donc } 0 = -(1/2) \cdot g \cdot \frac{x_m^2}{(v_0 \cdot \sin\alpha)^2} + \frac{x_m}{\tan \alpha}$$

$$\text{Donc } (1/2) \cdot g \cdot \frac{x_m^2}{(v_0 \cdot \sin\alpha)^2} = \frac{x_m}{\tan \alpha}$$

Donc :

$$x_m = \frac{2(v_0 \cdot \sin \alpha)^2}{g \cdot \tan \alpha} = \frac{2v_0^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}$$

e. La goutte atterrit le plus loin pour $\sin 2\alpha_0 = 1$, donc pour $\alpha_0 = 45°$.
On a alors :
$x_m = \dfrac{v_0^2}{g} = \dfrac{17{,}1^2}{9{,}80} = 29{,}8$ m.
Cela n'est pas adapté à un bassin de 5 m de rayon.

Manuel p. 423

Énergie : conversions et transferts

2. BALLON DE CHAUFFAGE SANITAIRE

1. Les modes de transfert thermique ayant lieu dans un ballon de chauffage sanitaire sont :
– la conduction, dans l'eau, entre l'eau et la paroi, dans la paroi et entre la paroi et l'air ;
– la convection, dans l'eau et dans l'air.

2. a. L'énergie nécessaire pour chauffer l'eau du ballon est égale à :
$\Delta E = P \cdot \Delta t$
Or $\Delta E = \Delta U = Q = m_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$.
On a donc l'égalité :
$P \cdot \Delta t = m_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$

$$\text{Donc } \Delta t = \frac{m_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T}{P} = \frac{\rho_{eau} \cdot V_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T}{P}$$

$$\textbf{AN :} \ \Delta t = \frac{1\,000 \times 200 \times 10^{-3} \times 4\,180 \times (65 - 15)}{2\,200}$$

$$= 19\,000 \text{ s} = 5 \text{ h } 17 \text{ min}$$

b. On retrouve la valeur donnée dans le document du fabricant.

$$\textbf{3. } R = \frac{e}{\lambda \cdot S} = \frac{70 \times 10^{-3}}{0{,}036 \times 2{,}9} = 0{,}67 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R} = \frac{65 - 20}{0{,}67} = 67 \text{ W}$$

4. a. $\Delta U = \Phi \cdot \Delta t = 67 \times 24$
$= 1{,}6 \times 10^3$ Wh

$$\textbf{b. } C_r = \frac{1{,}6 \times 10^3}{(65 - 20) \times 200} = 0{,}18 \text{ Wh} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$$

On retrouve la valeur donnée dans le document du fabricant.

3. UN COMPRIMÉ D'ASPIRINE DANS UN VERRE D'EAU

› 1. Étude de la réaction au laboratoire

1. La pression d'un gaz a pour origine les chocs des particules microscopiques sur les parois du récipient. Plus les chocs sont fréquents, plus la valeur mesurée de la pression du système est élevée. Dans le cas de l'étude, le nombre de particules constituant le gaz étant en augmentation (suite à la réaction chimique qui produit des molécules de dioxyde de carbone), il y a augmentation de la fréquence des chocs, donc de la pression.

2. a. $P_{CO_2} \cdot V = n_{CO_2} \cdot R \cdot T$

$$\text{Donc } n_{CO_2} = \frac{V}{R \cdot T} \cdot P_{CO_2}$$

$T(\text{K}) = \theta(°\text{C}) + 273 = 26 + 273 = 299$ K

$$\frac{V}{R \cdot T} = \frac{3{,}00 \times 10^{-4}}{8{,}31 \times 299} = 1{,}21 \times 10^{-7} \text{ S.I.}$$

$$n_{CO_2} = 1{,}21 \times 10^{-7} \times P_{CO_2}$$

b. Le modèle utilisé est celui du gaz parfait. Il s'agit d'une simplification de la réalité. Un gaz parfait n'existe pas en tant que tel mais les gaz réels, dans certaines conditions, ont un comportement qui s'en approche.
Dans les gaz réels, les molécules interagissent plus ou moins entre elles. Dans le modèle du gaz parfait, toutes les interactions entre les molécules (à l'exception de celles qui ont lieu lors de chocs entre elles) sont négligées.
À de faibles pressions allant jusqu'à quelques bars, c'est-à-dire lorsque les molécules qui constituent le gaz sont très éloignées les unes des autres, un gaz réel se comporte comme un gaz parfait.

3. Sur la courbe de la figure 2, on voit qu'au bout d'un certain temps ($t > 500$ s), la pression se stabilise, donc il n'y a plus formation de nouvelles molécules de dioxyde de carbone : la réaction est terminée.

4. La quantité de matière gazeuse formée a créé une surpression :
$P_{CO_2} = 210$ hPa $= 2{,}10 \times 10^4$ Pa
$n_{CO_2} = 1{,}21 \times 10^{-7} \times P_{CO_2}$, d'après la question **2. a.**
$n_{CO_2} = 1{,}21 \times 10^{-7} \times 2{,}10 \times 10^4 = 2{,}54 \times 10^{-3}$ mol

5. a. D'après les coefficients stœchiométriques de l'équation de réaction :
$n_{asp} = n(C_9H_8O_4) = n_{CO_2} = 2{,}54 \times 10^{-3}$ mol
b. $m_{asp} = n_{asp} \cdot M_{asp}$
$M_{asp} = M(C_9H_8O_4) = 9 \times 12 + 8 + 4 \times 16 = 180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Donc $m_{asp} = 2{,}54 \times 10^{-3} \times 180 = 0{,}457$ g $= 457$ mg.
C'est une valeur proche de la valeur indiquée, 500 mg.

› 2. Refroidissement à l'air libre de la solution obtenue

1. a. Comme la température de la solution diminue, on peut en déduire que son énergie interne diminue.

b. Les énergies cinétiques microscopiques sont liées à l'agitation thermique des particules qui constituent le système. Elles diminuent avec la température du système.

2. a. Un transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide, donc ici de la solution vers l'extérieur.

b. Le principal mode de transfert thermique mis en jeu est ici la conduction, puisqu'il y a contact entre le système et l'extérieur. Au niveau microscopique, l'agitation thermique diminue de proche en proche mais sans transport général de matière.

3. a. C'est la valeur de la température environnante, donc $T_{th} = 5°$ C.

b. La solution générale de l'équation différentielle s'écrit :

$T(t) = (T(0) - T_{th}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$, où B est une constante.

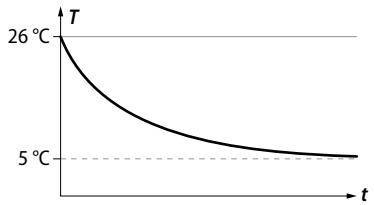
À $t = 0$, $T(t) = T(0) = 26$ °C.

Quand t tend vers l'infini, $T = B = T_{th} = 5$ °C.

Donc $T(t) = (26 - 5) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 5$.

Donc $T(t) = 21e^{-\gamma \cdot t} + 5$.

c.



4. À $t = 5$ min, $T(t) = 23$ °C.

$21e^{-5\gamma} + 5 = 23$

Soit $e^{-5\gamma} = \frac{18}{21} = \frac{6}{7}$, donc :

$-5\gamma = \ln\frac{6}{7}$, donc $\gamma = \frac{\ln\frac{7}{6}}{5}$.

5. $T(t) = 21e^{-\frac{\ln\frac{7}{6}}{5} \cdot t} + 5$

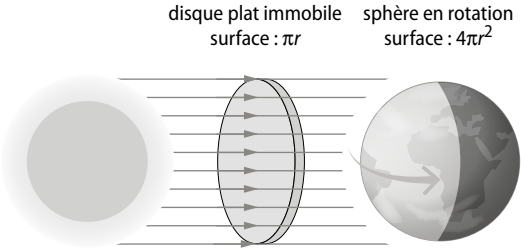
Donc au bout de 10 min :

$T(10) = 21e^{-\frac{\ln\frac{7}{6}}{5} \times 10} + 5 = 20$ °C

4. FLUX THERMIQUE REÇU DU SOLEIL ET CONSÉQUENCES

› 1. Température moyenne à la surface de la Terre

1.



Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de la Terre :

$\Phi = F \cdot \text{surface(disque)} = F' \cdot \text{surface(Terre)}$

$F \cdot \pi \cdot r^2 = F' \cdot 4\pi \cdot r^2$

Donc $F' = \frac{F}{4}$.

$F' = \frac{1\,368}{4} = 342$ W · m^{-2}

2. a. L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchie et n'est donc pas absorbée.

b. Le flux thermique par unité de surface réellement absorbé par la Terre est :

$F'' = (1 - 0{,}30)F' = 0{,}70 \times 342 = 239$ W · m^{-2}

3. a. $\Phi_{\text{réémis par la Terre}} = \Phi_{\text{absorbé}}$

Donc $\sigma \cdot T^4 = F''$

Donc $T^4 = \frac{F''}{\sigma} = \frac{239}{5{,}67 \times 10^{-8}}$

Soit $T = 255$ K, ce qui correspond à une température de – 18 °C.

b. La température moyenne à la surface de la Terre est d'environ 15 °C. La Terre n'est pas un « corps noir » et l'écart constaté provient aussi de l'existence de l'effet de serre (phénomène naturel de réchauffement d'une planète, provoqué par des gaz de son atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol).

› 2. Le « grand four solaire » d'Odeillo

A. Principe de fonctionnement

1. Le flux thermique reçu par unité de surface de miroir pendant l'utilisation du « grand four solaire » est de $F = 710$ W · m^{-2}.

Les héliostats ont une superficie totale $S_h = 2\,835$ m^2.

La réflectivité des miroirs des héliostats est $r = 70$ %.

On en déduit la valeur du flux thermique réfléchi par l'ensemble des héliostats :

$\Phi_h = F \cdot S_h \cdot r$

Donc $\Phi_h = 710 \times 2\,835 \times 0{,}70 = 1{,}43 \times 10^6$ W

2. La réflectivité des miroirs du concentrateur est égale à $r = 70$ %.
On en déduit la valeur du flux thermique au foyer :
$\Phi_c = \Phi_h \cdot r$ donc :
$\Phi_c = 1{,}43 \times 10^6 \times 0{,}70 = 1{,}00 \times 10^6$ W
$= 1{,}00$ MW $= 1\,000$ kW
On retrouve bien la valeur annoncée.

B. Une expérience étonnante

1. $m = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot e = \rho \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot e$
Donc :
$m = 7\,200 \times \pi \times \left(\frac{0{,}40}{2}\right)^2 \times 10 \times 10^{-3} = 9{,}0$ kg

2. a. Pour un système au repos et incompressible :
$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T$, donc :
$\Delta U = 9{,}0 \times 460 \times (1\,500 - 20)$
$= 6{,}1 \times 10^6$ J $= 6{,}1$ MJ

b. $\Delta U_f = m \cdot L_f$
$\Delta U_f = 9{,}0 \times 2{,}50 \times 10^5 = 2{,}3 \times 10^6$ J $= 2{,}3$ MJ

c. $\Delta U_{totale} = \Delta U + \Delta U_f = 8{,}4$ MJ
$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$ donc $\Delta t = \frac{Q}{\Phi}$.
$\Delta U_{totale} = Q$ (système au repos et incompressible)
Donc $\Delta t = \frac{8{,}4 \times 10^6}{1{,}00 \times 10^6} = 8{,}4$ s.

d. La valeur expérimentale est 1 minute et 27 secondes (87 s), donc 10 fois plus importante. La différence peut venir de différents transferts thermiques qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle :
– comme, au niveau du foyer, la température peut atteindre 3 400 °C qui est une température supérieure à la température d'ébullition de l'acier (2 800 °C), il est possible qu'une partie de l'acier soit passée à l'état gazeux ;
– une partie de l'énergie thermique de l'acier a sans doute été transférée par conduction à l'air environnant ;
– l'acier réfléchit aussi une partie du flux thermique reçu.

Ondes et signaux

2. ÉTUDE D'UN DIPÔLE RC

1. Lorsque l'intensité du courant dans le circuit s'annule, la tension aux bornes du conducteur ohmique est nulle et donc la tension u_c aux bornes du condensateur est égale à la tension délivrée par le générateur. Autrement dit, $u_c = u_0 = 12{,}0$ V

2. a. $\tau = R \cdot C$

b. $\dim \tau = \dim R \cdot \dim C$

$$= \frac{\dim U}{\dim I} \cdot \frac{\dim q}{\dim U} = \frac{\dim q}{\dim I}$$

Or $\dim q = \dfrac{\dim I}{\dim t}$.

D'où $\dim \tau = \dim t = \mathrm{T}$.

Le temps caractéristique a bien la dimension d'un temps.

3. a. En appliquant la loi d'additivité des tensions, on peut écrire que :

$u_0 = R \cdot i + u_c$

Comme $i = \dfrac{dq}{dt} = C \cdot \dfrac{du_c}{dt}$, on peut écrire que :

$R \cdot C \cdot \dfrac{du_c}{dt} + u_c = u_0$

b. À $t = 0$, $u_c = 0$ donc $R \cdot C \cdot \left(\dfrac{du_c}{dt}\right)_{(t=0)} = u_0$.

La valeur de $\left(\dfrac{du_c}{dt}\right)_{(t=0)}$ est le coefficient directeur de la tangente à l'origine de la courbe $u_C = f(t)$.

Donc $\left(\dfrac{du_c}{dt}\right)_{(t=0)} = \dfrac{u_0}{R \cdot C}$ est ce coefficient directeur.

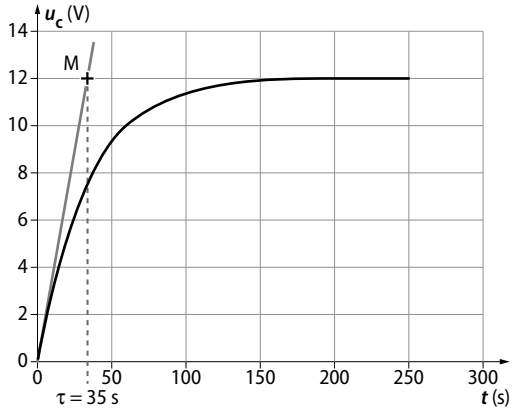
L'équation de la tangente s'écrit donc :

$u_C = \left(\dfrac{du_c}{dt}\right)_{(t=0)} \cdot t = \dfrac{u_0}{R \cdot C} \cdot t$

Cette tangente coupe la droite $u_c = u_0$ pour une valeur de t qui vérifie :

$\dfrac{u_0}{R \cdot C} \cdot t = u_0$ donc $t = R \cdot C = \tau$.

c. On peut déterminer ainsi la valeur de τ sur la figure 3 :



On a donc $\tau = 35$ s.

4. On en déduit la capacité C du condensateur :

$C = \dfrac{\tau}{R} = \dfrac{35}{330 \times 10^3}$

$= 106 \times 10^{-6}$ F $= 106$ µF

5. La valeur indiquée par le constructeur est :

$C = 100$ µF à 20 % près.

Donc l'intervalle possible de valeurs donné par le constructeur est :

80 µF $\leqslant C \leqslant$ 120 µF

La valeur obtenue en **4.** est bien dans cet intervalle.

3. CONNEXION WIFI POUR PILOTER UN DRONE

› 1. Transmission d'informations avec le protocole standard IEEE 802.11 g

1. D'après le tableau de l'énoncé, l'atténuation en fonction de la distance s'écrit :

$A = 40 + 20 \log(d)$

Donc si $d = 10$ m, $A = 40 + 20 \log(10) = 60$ dB.

2. D'après l'énoncé, la relation entre l'atténuation et la puissance est :

$A = 10 \log\left(\dfrac{P_e}{P_r}\right)$

Donc : $\dfrac{P_e}{P_r} = 10^{\frac{A}{10}}$

D'où : $P_r = P_e \cdot 10^{-\frac{A}{10}}$.

D'après le tableau de l'énoncé, la puissance maximale d'émission est égale à $P_{em} = 100$ mW.
On en déduit que :

$P_{rm} = 100 \times 10^{-\frac{60}{10}} = 1{,}0 \times 10^{-4}$ mW

3. On note D le débit.
D = nombre d'images par seconde × nombre de bits par image
$D = 30 \times 1280 \times 720 \times 24$
$= 6{,}64 \times 10^8$ bits = 664 Mbits · s^{-1}
Ce débit est supérieur au débit théorique de la connexion wifi, donc il ne sera pas possible de visualiser directement la vidéo sur le téléphone portable.

› 2. Les problèmes de transmission en wifi

1. Le drone s'éloigne, donc $f_R < f_E$.

$f_R - f_E = -\dfrac{v}{c} \cdot f_E$

Donc $f_R = f_E - \dfrac{v}{c} \cdot f_E = f_E \cdot \left(1 - \dfrac{v}{c}\right)$

$= 2{,}4 \times \left(1 - \dfrac{3{,}0}{3{,}0 \times 10^8}\right) = 2{,}4$ GHz

La variation relative de fréquence est égale à :

$\dfrac{|f_R - f_E|}{f_E} = \dfrac{v}{c} = 10^{-8} \ll 1$

C'est une variation très faible.

2. $\lambda_E = \dfrac{c}{f_E} = \dfrac{3{,}0 \times 10^8}{2{,}4 \times 10^9} = 0{,}13$ m

3. Si l'on considère que l'ordre de grandeur du diamètre d'un tronc d'arbre est de $a = 10$ cm = 0,10 m, alors $\lambda_E \approx a$, donc un tronc d'arbre placé sur le trajet des ondes wifi est susceptible de diffracter ces ondes.

4. On a des interférences destructives quand la différence de chemin δ est telle que :

$\delta = (2k + 1) \cdot \dfrac{\delta}{2}$ avec k un entier relatif.

Dans ce cas, la puissance reçue est fortement réduite.

5. Comme $\lambda = c \cdot T$, on a des interférences destructives quand la différence de chemin δ est telle que :

$\delta = (2k + 1) \dfrac{c \cdot T}{2}$ avec k un entier relatif, autrement dit quand :

$\Delta t = (2k + 1) \cdot \dfrac{T}{2}$

Donc on a des interférences constructives quand :

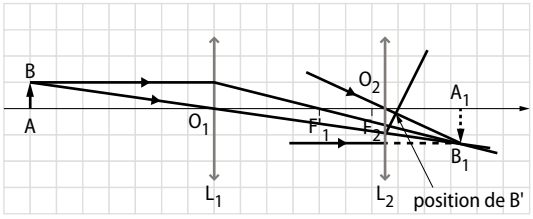
$\Delta t = \dfrac{T}{2}$ (k = 0) ;

$\Delta t = k \cdot T + \dfrac{T}{2}$ (= $(2k + 1) \cdot \dfrac{T}{2}$).

4. MAQUETTES D'INSTRUMENTS OPTIQUES À DEUX LENTILLES CONVERGENTES

› 1. Une première maquette

1.



2. a. $\dfrac{1}{\overline{O_1A_1}} - \dfrac{1}{\overline{O_1A}} = \dfrac{1}{\overline{O_1F'_1}}$

Donc $\dfrac{1}{\overline{O_1A_1}} - \dfrac{1}{-1{,}4} = \dfrac{1}{0{,}8}$.

On en déduit que $\overline{O_1A_1} = 1{,}87$ m.

$\dfrac{1}{\overline{O_2A'}} - \dfrac{1}{\overline{O_2A_1}} = \dfrac{1}{\overline{O_1F'_2}}$

$\overline{O_2A_1} = \overline{O_2O_1} + \overline{O_1A_1} = -1{,}3 + 1{,}87 = 0{,}57$ m

Donc $\dfrac{1}{\overline{O_2A'}} - \dfrac{1}{0{,}57} = \dfrac{1}{0{,}1}$.

On en déduit que $\overline{O_2A'} = 0{,}085$ m.

b. L'échelle de la figure 1 est 1 carreau ↔ 20 cm.
La distance O_1A_1 couvre environ 9,1 carreaux, soit environ 182 cm.
La distance O_2A' couvre environ 0,4 carreau soit environ 8 cm.
Ces valeurs, bien que moins précises, sont cohérentes avec celles qui déroulent des calculs qui se basent sur la relation de conjugaison.

3. L'image A'B' de l'objet AB obtenue à l'aide de cet instrument optique est réelle ($\overline{O_2A'} > 0$) et renversée (orientée vers le bas).

4. On peut parler de grandissement dans le cas de la maquette réalisée car les valeurs AB et A'B' peuvent être déterminées.

$\gamma = \dfrac{A'B'}{AB} = \dfrac{A'B'}{A_1B_1} \cdot \dfrac{A_1B_1}{AB}$

Comme les triangles O_1AB et $O_1A_1B_1$ sont homothétiques, on peut écrire :

$\dfrac{A_1B_1}{AB} = \dfrac{O_1A_1}{O_1A}$

Comme les triangles $O_2A_1B_1$ et $O_2A'B'$ sont homothétiques, on peut écrire :

$\dfrac{A'B'}{A_1B_1} = \dfrac{O_2A'}{O_2A_1}$

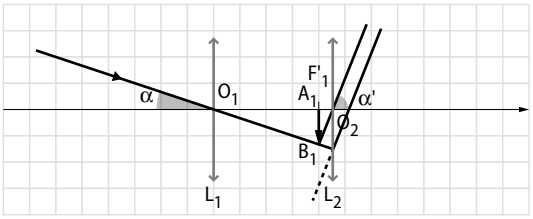
Donc $\gamma = \dfrac{O_2A'}{O_2A_1} \cdot \dfrac{O_1A_1}{O_1A}$.

Donc $\gamma = \dfrac{0{,}085}{0{,}57} \times \dfrac{1{,}87}{1{,}4} = 0{,}2.$

› 2. La maquette d'une lunette astronomique

1. Une lunette astronomique est utilisée pour observer des objets lumineux lointains (à l'infini). L'image finale donnée par L_2 est rejetée à l'infini et elle est plus grosse que l'objet observé.

2. a. et **3. a.**



b. L'objectif est la lentille qui est du côté de l'objet (ici L_1).
L'oculaire est la lentille du côté où on place l'œil (ici L_2).
Le cercle oculaire est l'image de l'objectif à travers l'oculaire. L'intensité lumineuse y est maximale, il convient donc d'y placer l'œil de l'observateur.

3. a. Voir figure précédente.
b. L'image de l'astre observée à travers la lunette se trouve à l'infini en avant des deux lentilles. Elle est virtuelle et plus grosse que l'objet.

c. $\alpha \approx \tan\alpha = \dfrac{A_1B_1}{O_1F_1'}$

$\alpha' \approx \tan\alpha' = -\dfrac{A_1B_1}{O_2F_2}$

Donc $G = \dfrac{\alpha'}{\alpha} = -\dfrac{A_1B_1}{O_2F_2} \cdot \dfrac{O_1F_1'}{A_1B_1} = \dfrac{O_1F_1'}{O_2F_2}.$

Donc $G = -\dfrac{0{,}8}{0{,}1} = -8.$

d. Dans le cas d'une lunette astronomique, on ne peut pas parler de grandissement car les valeurs AB et A'B' ne peuvent pas être déterminées (objet et image sont à l'infini).

4. L'observateur doit placer l'œil au cercle oculaire. Il n'accommode pas car l'image définitive est à l'infini.

5. L'AVION SOLAIRE « SOLAR IMPULSE » : UN CHALLENGE ÉNERGÉTIQUE À RELEVER

› 1. Étude du vol de jour

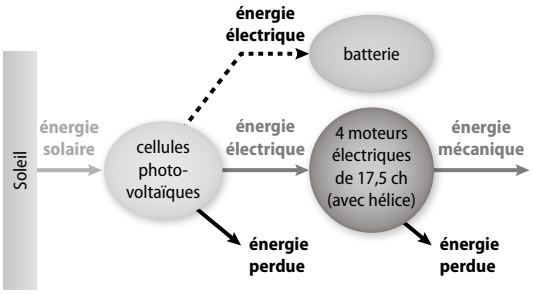
La puissance solaire reçue par les 269,5 m² de cellules solaires de l'avion est :
$P_{\text{sol cellules}} = 269{,}5 \times 1\,000 = 269{,}5$ kW

2. En tenant compte du rendement de 23 % des cellules solaires :
$P_{\text{élec cellules}} = P_{\text{sol cellules}} \times 0{,}23$
$= 269{,}5 \times 0{,}23 = 62{,}0$ kW

3. $P_{\text{méca moteurs}} = 4 \times 17{,}5 \times 735{,}5 = 51{,}5$ kW
Le rendement étant de 94 % :
$P_{\text{élec moteurs}} = \dfrac{P_{\text{méca moteurs}}}{0{,}94} = 54{,}8$ kW
Donc $P_{\text{élec cellules}} > P_{\text{élec moteurs}}$.
La puissance électrique fournie par les cellules est donc suffisante pour alimenter les quatre moteurs.

4. L'énergie stockée dans les batteries est :
$E_{\text{stockée bat}} = 663 \times 260 = 165$ kWh
25 % de la puissance électrique produite par les cellules solaires est en moyenne utilisée pour la recharge des batteries, donc :
$P_{\text{stockée bat}} = 0{,}25 \times P_{\text{élec cellules}}$
$= 0{,}25 \times 62{,}0 = 15{,}5$ kW
On en déduit la durée d'exposition solaire nécessaire :
$\Delta t = \dfrac{E_{\text{stockée bat}}}{P_{\text{stockée bat}}} = \dfrac{165}{15{,}5} = 10{,}6$ h

5.



› 2. Cellule photovoltaïque et effet photoélectrique

1. Les concepteurs de l'avion *Solar Impulse* ont retenu les cellules en silicium monocristallin en raison de leur durabilité et de leur rendement supérieur aux autres.

2. Le rendement de 23 % des cellules photovoltaïques de *Solar Impulse* ne peut pas être qualifié de bon rendement d'énergie. Dans la partie 1, par exemple, on parle de moteurs qui ont un rendement de 94 %.

3. $E_g = h \cdot \nu = \dfrac{h \cdot c}{\lambda}$

donc $\lambda = \dfrac{h \cdot c}{E_g} = \dfrac{6{,}62 \times 10^{-34} \times 3{,}0 \times 10^8}{1{,}12 \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$
$= 1{,}10 \times 10^{-6}$ m $= 1\,100$ nm

4. Il faut que $E_{\text{photon}} > E_g$, donc que $\lambda < 1\,100$ nm, ce qui correspond aux zones B et C du document 2.

6. MESURE DE LA CAPACITÉ D'UN CONDENSATEUR

› 1. Première méthode

1. $I = \dfrac{dq}{dt}$

$q = C \cdot u_{AB}$

Donc $I = C \cdot \dfrac{du_{AB}}{dt}$, soit $\dfrac{du_{AB}}{dt} = \dfrac{I}{C}$.

Donc $u_{AB} = \dfrac{I \cdot t}{C}$ car à $t = 0$, $u_{AB} = 0$.

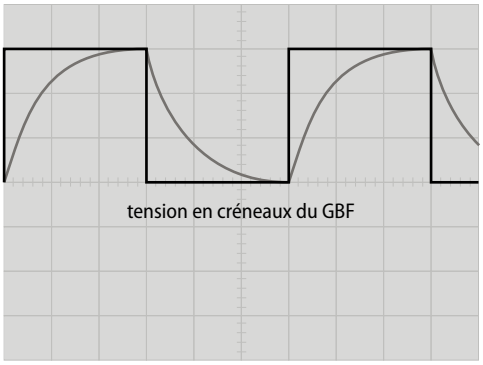
2. $u_{AB} = \dfrac{I \cdot t}{C}$ donc $C = \dfrac{I \cdot t}{u_{AB}}$.

$C = I \cdot \dfrac{t_1}{u_1} = \dfrac{10 \times 10^{-6} \times 7{,}2}{6{,}0} = 12\ \mu F$

› 2. Deuxième méthode

1. a. Sur les écrans 1 et 2, on visualise une succession de charges et de décharges du condensateur. Cette allure s'explique par le signal en créneaux du GBF.

b.



c. Période du signal délivré par le GBF :
$T = 3\ \text{div} \times 20\ \text{ms} \cdot \text{div}^{-1} = 60\ \text{ms}$

On en déduit la fréquence : $f = \dfrac{1}{T} = 17\ \text{Hz}$.

2. $\tau = R \cdot C$

3. D'après la loi d'additivité des tensions, on peut écrire :

$u_m = R \cdot i + u_c$

$i = \dfrac{dq}{dt}$ et $q = C \cdot u_C$.

Donc $i = \dfrac{dq}{dt} = C \cdot \dfrac{du_c}{dt}$.

On en déduit que : $u_m = R \cdot C \cdot \dfrac{du_c}{dt} + u_c$.

4. Si $t = \tau = R \cdot C$, alors :

$u_c = u_m \cdot (1 - e^{-1}) = 0{,}63 \times u_m$
$= 0{,}63 \times 6 = 3{,}78\ \text{V}$

5. À $t = 0$, $u_c = 0$ donc $\dfrac{du_c}{dt} = \dfrac{u_m}{R \cdot C}$.

Il s'agit du coefficient de la tangente à l'origine, qui a comme équation :

$u = \dfrac{u_m}{R \cdot C} \cdot t$

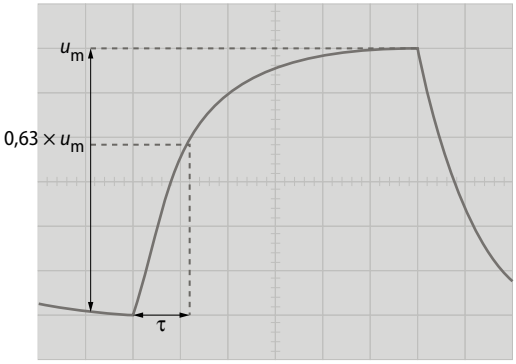
Cette tangente coupe la droite $u = u_m$ en un point où :

$u_m = \dfrac{u_m}{R \cdot C} \cdot t$ donc où $t = R \cdot C = \tau$.

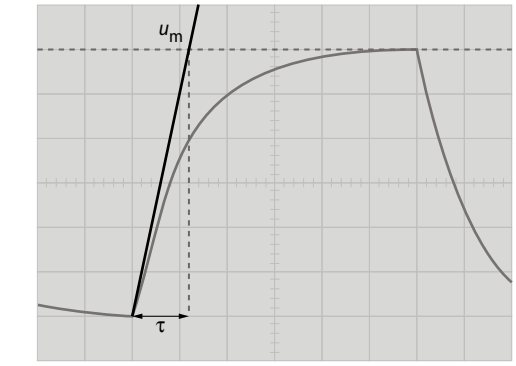
6. Sur l'écran 2, le cadrage a été modifié (le « 0 » a été décalé, la valeur $u = 0$ V ne correspond plus à l'axe horizontal du milieu) afin d'observer en « plein écran » une période du signal.

7. On utilise l'écran 2, qui est en « plein écran ».

• **Méthode 1 :** On repère u_m et on détermine la valeur de t pour laquelle $u = 0{,}63 \times u_m$.



• **Méthode 2 :** On trace la tangente à l'origine qui coupe la droite $u = u_m$ à $t = \tau$.



Quelle que soit la méthode utilisée, on a :
$\tau = 1{,}2 \times 10\ \text{ms} = 12\ \text{ms}$

8. a. $\tau = R \cdot C$ donc $C = \dfrac{\tau}{R} = \dfrac{12 \times 10^{-3}}{1\,000} = 12\ \mu F$.

b. La valeur indiquée par le constructeur est :
$C = 12\ \mu F$ à 5 % près.

Ce qui signifie que : $0{,}95 \times 12\ \mu F < C < 1{,}05 \times 12\ \mu F$

Donc $11{,}5\ \mu F < C < 12{,}5\ \mu F$. Cela correspond bien au résultat trouvé.