Collection SIRIUS

ÉDITION 2017

Term S

ENSEIGNEMENT SPÉCIFIQUE

Physique Chimie

NOUVEAU BAC

Livre du professeur

Nathan

Collection
SIRIUS

Term S
ENSEIGNEMENT SPÉCIFIQUE

ÉDITION 2017

Physique Chimie

Livre du professeur

Nathan

Schémas : CORÉDOC
Composition, mise en page : Linéale
Édition : Morgane Boubault, Pauline Bley, Émilie Bongard

© Nathan 2017 – 25, avenue Pierre de Coubertin – 75013 Paris
ISBN 978-2-09-171965-8

Sommaire

Ondes et matière

1. Ondes et particules 5
2. Caractéristiques des ondes 13
3. Ondes sonores 21
4. Diffraction des ondes et interférences 31
5. Spectres UV-visible et IR 39
6. Spectres de RMN 49

Lois et modèles

7. Principe d'inertie et quantité de mouvement 63
8. Lois de Newton 75
9. Mouvements des satellites et planètes 91
10. Oscillateurs et mesure du temps 105
11. Relativité du temps 115
12. Temps et évolution chimique : cinétique et catalyse 125
13. Stéréoisomérie des molécules organiques 135
14. Transformation en chimie organique 145
15. Théorie de Brönsted. Notion d'équilibre chimique 153
16. Couples acide faible/base faible. Solution tampon 165
17. Transferts thermiques d'énergie 175
18. Transferts quantiques d'énergie 185
19. Dualité onde-particule 193

Défis du XXIe siècle

20. Enjeux énergétiques et environnementaux 205
21. Contrôle de la qualité : dosages 213
22. Stratégie de la synthèse organique 221
23. Sélectivité en chimie organique 231
24. Transmettre et stocker de l'information 241

CHAPITRE 1

OBSERVER

Ondes et particules

> Manuel pages 8 à 25

Choix pédagogiques

Il s'agit dans ce chapitre d'une introduction à la description du comportement de la matière sous son double aspect d'ondes et de particules, sans développement théorique. Le chapitre est construit à partir de l'idée directrice que ondes et particules sont des intermédiaires de transmission des informations qui permettent aux scientifiques de comprendre l'Univers proche ou lointain.
Pour cette partie du programme, la compétence « Extraire et exploiter des informations » domine largement dans les compétences exigibles. Pour cette raison, le cours contient une seule page « l'Essentiel » qui résume les quelques connaissances exigibles et la majorité des exercices repose sur l'étude d'un ou plusieurs documents.
Par souci de cohérence et pour ne pas alourdir ce chapitre, l'item du programme « Niveau d'intensité sonore » est traité au chapitre 3 avec les ondes sonores.
Des animations illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Le FAST

Quelles informations souhaite-t-on collecter grâce à ce radiotélescope ?

La photographie d'ouverture présente le FAST, le plus grand radiotélescope sur Terre. Elle permet de questionner les élèves sur les problématiques générales du chapitre : quelles informations collecte-t-on ? Comment les collecte-t-on et pourquoi les collecte-t-on ?
Un questionnement autour des dispositifs spatiaux et terrestres peut être mené. Les élèves trouveront ensuite les réponses à ces questions dans l'activité 1 et l'exercice 25.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Observation de l'Univers sur Terre et dans l'espace

Commentaires

Cette activité est destinée à montrer que la présence de l'atmosphère terrestre conditionne les observations des rayonnements de l'Univers. Elle s'appuie sur l'analyse d'un graphique et la mise en relation d'informations extraites des deux documents.

Réponses

S'APPROPRIER

1. En abscisse sont portées les longueurs d'ondes dans le vide des différents rayonnements électromagnétiques. Il faudra remarquer que l'échelle utilisée n'est pas linéaire et on pourra expliquer à cette occasion ce qu'est une échelle logarithmique. On complète l'échelle en multipliant par 10 la valeur indiquée sous la graduation qui précède.

CONNAÎTRE

2. A = ultraviolet, fréquences comprises entre 10^{15} et 10^{17} Hz
B = visible, fréquences comprises entre 10^{13} et 10^{15} Hz
C = infrarouge fréquences comprises entre 10^{11} et 10^{13} Hz
D = domaine radio fréquences comprises entre 10^{7} et 10^{9} Hz

ANALYSER

3. En ordonnée est représentée la proportion de rayonnement arrêté par l'atmosphère avant d'atteindre le sol pour une longueur d'onde donnée. 100 % correspond à un rayonnement n'atteignant pas le sol ; 0 % correspond à un rayonnement pour lequel l'atmosphère est parfaitement transparente.

VALIDER

4. En comparant les informations extraites des documents 1 et 2 :
– VLT : détecte les radiations des UV à IR.
Ondes électromagnétiques en grande partie non absorbées par l'atmosphère → Instrument sur Terre.
– Radiotélescope : détecte les ondes radio.
Ondes en grande partie transmise par l'atmosphère → Instrument sur terre.
– Observatoire spatial Planck : détecte entre $3{\cdot}10^{-3}$ et $3{\cdot}10^{-2}$ m et entre 10^{-4} m et 10^{-3} m.
Ondes absorbées par l'atmosphère → instrument dans l'espace.
– Satellite Hubble : détecte les IR.
Ondes absorbées par l'atmosphère → instrument dans l'espace.
Le choix de placer des instruments dans l'espace est motivé par la contrainte de l'atmosphère qui absorbe certaines ondes.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
L'astronomie de l'invisible

Commentaires

Nous approfondissons ici des exemples destinés à montrer l'intérêt des rayonnements électromagnétiques non visibles pour l'étude de l'Univers.

Réponses

CONNAÎTRE

1. Le rayonnement thermique est le rayonnement émis par un corps uniquement sous l'effet de sa température.

S'APPROPRIER

2. Le nuage est beaucoup trop froid pour émettre dans le visible. Son rayonnement thermique a son maximum d'émission dans l'infrarouge et il est brillant dans ce domaine de radiation.

ANALYSER

3. a. Sur la photographie ⓐ, dans le domaine visible, le nuage de gaz et de poussière qui remplit la galaxie arrête une grande partie du rayonnement ; d'autre part, certaines étoiles émettent trop faiblement dans le visible et n'apparaissent pas. Sur la photographie ⓑ, en rayonnement infrarouge, le nuage devient transparent et laisse apercevoir des étoiles situées à l'arrière ; de plus, le nuage lui-même émet un rayonnement infrarouge qui le rend visible sur la photographie. Sur la photographie ⓒ, ce sont des étoiles brillantes dans l'ultraviolet qui deviennent visibles alors qu'elles n'apparaissaient pas sur la photographie ⓐ.

b. Plus la température est élevée, plus la longueur d'onde du maximum d'émission est petite. Les étoiles les plus chaudes apparaissent en bleu (couleur utilisée sur le document pour les UV lointains).

RÉALISER

4. D'après l'échelle indiquée sur la photo, la zone d'émission radio occupe une longueur totale d'environ $1{,}4 \times 10^6$ a.l.

VALIDER

5. Le rayonnement visible ne constitue qu'une faible partie des rayonnements électromagnétiques émis dans l'Univers. De nombreux objets de l'Univers n'émettent pas ou bien très faiblement dans le domaine visible. Même si un objet est visible, les rayonnements non visibles peuvent fournir des informations supplémentaires. Des milieux opaques à la lumière visible peuvent être transparents dans d'autres domaines.

3. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Les particules dans l'Univers

Commentaires

Les particules sont envisagées ici du point de vue du transport d'informations portant sur l'Univers et sur la structure intime de la matière. Les interactions avec l'atmosphère sont à nouveau évoquées.

Réponses

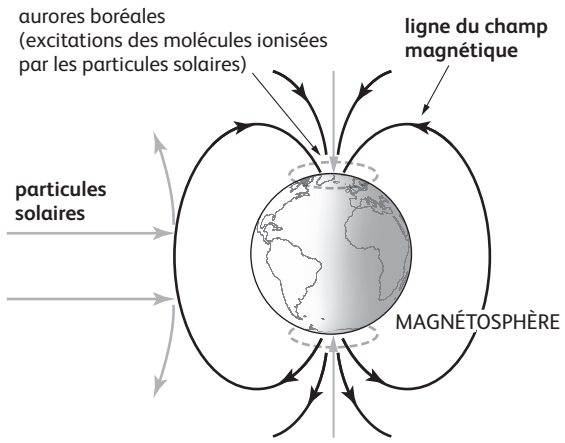
S'APPROPRIER

1. a. Le rayonnement cosmique est constitué de particules de hautes énergies se déplaçant dans l'espace.

b. Le schéma illustre la formation d'une gerbe de particules. En *A*, une particule provenant de l'espace interagit avec un atome de l'atmosphère terrestre déclenchant l'émission de plusieurs autres particules.

RÉALISER

2.



ANALYSER

3. La nature et l'énergie des particules présentes dans les rayons cosmiques ne sont pas prévisibles alors qu'un accélérateur permet de maîtriser les conditions des expériences.

VALIDER

4. Les rayons cosmiques apportent des renseignements sur le fonctionnement interne du Soleil (particules solaires) ou sur des évènements se produisant dans l'Univers lointain (particules galactiques et extragalactiques). On peut exploiter ces particules pour étudier leurs interactions avec la matière mais ce type d'étude se fait actuellement presque exclusivement avec les accélérateurs de particules.

Les résultats des chocs de particules de grandes énergies dans les accélérateurs permettent aux chercheurs d'étudier la structure intime de la matière, c'est-à-dire son fonctionnement au niveau subatomique.

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
À l'écoute de la Terre

Commentaires

Nous envisageons ici les ondes sismiques du point de vue du transfert d'informations : l'étude de ces ondes permet d'analyser la structure du globe terrestre.

Réponses

S'APPROPRIER

1. En abscisse est représenté le temps et en ordonnée le déplacement du sol enregistrée par le sismographe.

RÉALISER

2. E_{lib}(Haïti)/E_{lib}(Nantes) = $(31,6)^{(7-2)}$ = $3,15 \times 10^7$.

ANALYSER

3. a. D'après le sismogramme du document 1, l'onde P commence à se manifester au niveau du sismographe avant l'onde S. L'onde P (onde primaire) est donc plus rapide que l'onde S (onde secondaire).

b. On remarquera deux phénomènes :

– Au niveau d'une discontinuité, l'onde traverse en partie cette discontinuité avec changement de direction, ce qui est à rapprocher de la réfraction de la lumière.

– Une partie de l'onde est réfléchie au niveau de la discontinuité comme cela se produit également avec les rayons lumineux.

Remarque : on constate que les ondes ne se propagent pas en ligne droite. On peut évoquer à ce sujet les mirages et se rappeler que la courbure des rayons lumineux est due dans ce cas à la variation de vitesse de propagation de la lumière dans les différentes couches d'air. La courbure des ondes sismiques est aussi due aux variations de structure de l'intérieur du globe terrestre entraînant une variation de la vitesse de propagation.

c. Le signal PcP a subi une réflexion au niveau de la séparation entre le manteau et le noyau externe.

d. L'analyse de ce signal, connaissant la vitesse de l'onde dans le manteau, peut permettre de remonter à l'épaisseur du manteau terrestre.

COMMUNIQUER

4.

Données disponibles	Informations déduites
Date et lieu d'arrivée d'une onde	Position du foyer
Type d'onde	Trajectoire de l'onde
	Vitesse de propagation
	Structure du sous-sol
Magnitude	Energie libérée par le séisme

5. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Un capteur de lumière

Commentaires

Cette activité répond à la compétence exigible « Pratiquer une démarche expérimentale mettant en œuvre un capteur ou un dispositif de détection ». Nous avons choisi de modéliser un lecteur de code-barres, dispositif rencontré couramment mais dont le principe est en général peu connu. Le capteur proposé dans ce modèle est une photorésistance dont le principe de fonctionnement est particulièrement simple mais on peut envisager d'utiliser aussi une photodiode ou un phototransistor. Le système de codage est seulement évoqué, une étude approfondie pourra être faite dans le chapitre 26.

Cette activité présente une bonne opportunité pour faire établir un protocole par les élèves sous la forme d'une démarche d'investigation.

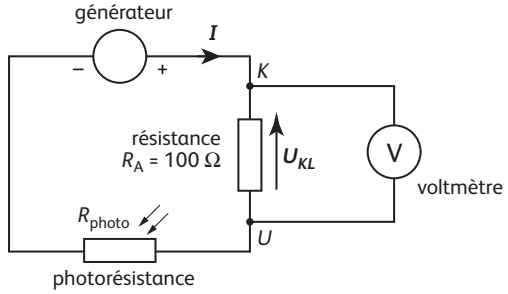
Réponses

ANALYSER

Les documents 1 et 2 doivent guider les élèves dans les choix à faire pour élaborer ce protocole.

• Utilisation d'une photorésistance et d'un ohmmètre.

En fonction des exigences attendues sur cette activité, on peut également faire réaliser une acquisition à l'élève à l'aide d'un système d'acquisition ou d'un oscilloscope. Dans ce cas, il faudra leur fournir le montage expérimental suivant :



• Utilisation d'une source de lumière diode laser.

Ce choix doit être justifié par la nécessité d'une source assez directive pour ne couvrir qu'une bande à la fois. Il est toutefois possible d'utiliser une petite lampe à condition de prévoir un dispositif limitant la largeur du faisceau.

L'élève peut choisir cette source uniquement grâce au document 1. Il peut être intéressant de discuter les raisons de ce choix.

• Utilisation d'un code-barre

On peut fournir aux élèves 2 types de code-barre : sur feuille transparente et sur papier. C'est à l'élève de comprendre le faisceau à détecter (transmis ou réfléchi).

RÉALISER

En transparence, le passage d'une bande claire s'observe par une faible résistance et le passage d'une bande sombre par une forte résistance. C'est l'inverse pour une photocopie papier.

La distinction entre bande large et bande étroite est donnée par la durée d'enregistrement.

VALIDER

Le signal enregistré dépend : de la vitesse de défilement ; de la position du code-barres (l'inclinaison des barres ou du support par rapport à la direction du défilement peuvent modifier la largeur apparente des barres) et du sens de défilement.

Le système informatique doit prendre en compte :

– les variations possibles du signal enregistré : prise en compte de valeurs relatives et non absolues.

– La vitesse aléatoire du signal enregistré : mesure de la vitesse du capteur.

EXERCICES Appliquer le cours

15. Connaître des sources de rayonnement
a. Les planètes, les astéroïdes et les poussières interstellaires.
b. Le soleil et les étoiles chaudes. (Ces sources émettent aussi souvent dans le visible.)
c. Le rayonnement fossile de l'univers ; les radiosources lointaines (il s'agit probablement d'ondes émises par des particules chargées fortement accélérées, par la présence d'un trou noir par exemple) ; l'hydrogène interstellaire émet une onde radio de fréquence caractéristique. Certaines galaxies supergéantes, appelées radiogalaxies, qui sont peut-être le résultat de la fusion entre plusieurs galaxies.

16. Connaître des sources de particules
Source de particules naturelles : le rayonnement cosmique, noyaux radioactifs émettant des particules β et α.
Source de particules artificielles : accélérateurs de particules, par exemple ; LHC à Genève en Suisse ou synchrotron Soleil en Essonne en France.

17. Reconnaître des sources de rayonnements
Bouche → Téléphone → Antenne1 → Antenne2 → Téléphone → Oreille
Onde sonore → Onde éléctromagnétique → Onde sonore

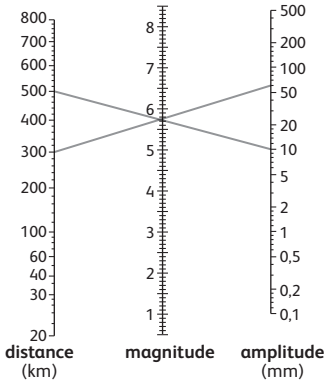
18. Commenter une affirmation
Léo a tort. Il sera « traversé » par les ondes électromagnétiques provenant d'émetteurs de stations de radio et de télévision, de satellites GPS et de télécommunications, etc., ainsi que par des particules issues du rayonnement cosmique et de la radioactivité naturelle.

19. Citer des capteurs électromagnétiques
a. Appareils de communication sans fil (téléphone sans fil ou portable), appareils fonctionnant en wifi, appareils télécommandés, etc.
b. Capteurs de lumière visible : appareil photo : barrière optique (porte d'ascenseur) ; déclenchement automatique des feux de croisement, etc.
c. Capteur de signal de télécommande d'un téléviseur, détecteur d'alarme antivol, caméra thermique, etc.

20. Comprendre le rôle de l'atmosphère terrestre
L'astronomie spatiale permet de capter des ondes qui sont arrêtées par l'atmosphère comme les infrarouges et les ultraviolets. On peut donc détecter et étudier des objets ou des phénomènes qui ne sont pas observables en astronomie terrestre : nuages de poussières et étoiles qui y sont dissimulées, étoiles très chaudes ou très froides non observables en lumière visible mais observables respectivement en ultraviolet et en infrarouge.
Le professeur pourra aussi évoquer d'autres rayonnements (X et gamma) produits par les phénomènes les plus violents de l'Univers tels que ceux provoqués par la présence d'un trou noir supermassif ou la formation d'une hypernova.

21. Analyser un dispositif de détection
a. Ce détecteur doit détecter les rayonnements infrarouges émis par les passagers.
b. La longueur d'onde du maximum d'émission (situé dans l'infrarouge) diminue lorsque la température augmente. L'écran indique avec des fausses couleurs la température des zones filmées et permet de repérer les personnes fiévreuses.

22. Utiliser une échelle logarithmique
a. La magnitude est représentée ici sur une échelle linéaire ; l'amplitude est représentée sur une échelle logarithmique : la distance entre les graduations est la même pour des valeurs qui sont dans le même rapport (ex : même distance entre 0,1 et 0,2 et 1 et 2). On évitera l'erreur de dire que les distances sont portées sur une échelle logarithmique car le critère précédent ne se vérifie pas.
b.



Par lecture graphique ce séisme est de magnitude 5,75.
c. Par lecture graphique, l'amplitude mesurée pour ce sismographe serait de 10 mm.

EXERCICES S'entraîner

23. Exercice résolu dans le manuel

24. Application de l'exercice résolu
D'après les calculs de l'exercice précédent, la longueur d'onde du maximum d'émission du rayonnement fossile est de 1×10^{-3} m. Ce rayonnement se situe dans le domaine des micro-ondes.
Lors de la formation des premiers atomes, la température de l'Univers était de $T = 3\,000$ K.

D'où $\lambda_m = \frac{k}{T} = \frac{2{,}9 \times 10^{-3}}{3\,000} = 9{,}7 \times 10^{-7}$ m $= 9{,}7 \times 10^{2}$ nm.

Ce rayonnement est dans le domaine des infrarouges.
L'expansion de l'Univers se traduit par une augmentation de la longueur d'onde de la lumière émise par des sources très anciennes ou très lointaines. C'est le phénomène de décalage vers le rouge (*red shift*), bien qu'ici on se déplace des rayonnements infrarouges vers les rayonnements micro-ondes.

25. Exercice résolu dans le manuel

26. Application de l'exercice résolu
Les rayonnements ultraviolets ont des longueurs d'onde comprises entre 10 et 300 nm (1×10^{-8} et 3×10^{-7} m). D'après le graphique c'est le dioxygène et l'ozone qui absorbent sur ce domaine.
Si la température d'une étoile augmente, la longueur d'onde de son maximum d'émission diminue. Si cette longueur d'onde devient plus faible que $4 \cdot 10^{-7}$ nm, on peut voir sur le graphique qu'elle est absorbée par le dioxygène et l'ozone et n'est donc plus détectable par un instrument d'observation au sol.
Si $\lambda_m < 4 \times 10^{-7}$ m
alors d'après la loi de Wien $\frac{k}{T} < 4 \times 10^{-7}$ m.

$$\frac{T}{k} = \frac{1}{4 \times 10^{-7}} = \frac{2{,}9 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-7}} = 7 \times 10^{3} \text{ K}.$$

Pour une température de surface supérieure à 7×10^3 K, le maximum d'émission d'une étoile n'est plus détectable par un observateur terrestre.

27. Apprendre à rédiger
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, communiquer.**
a. Au cours de la réaction nucléaire décrite, des noyaux d'atomes (ici, noyaux d'atomes d'hydrogène) s'associent pour former des atomes plus lourds. Il s'agit d'une réaction de fusion.
b. Les neutrinos proviennent des réactions nucléaires qui se produisent au cœur du Soleil comme c'est indiqué à la ligne 2. C'est donc de cette région qu'on peut obtenir des renseignements à partir de l'étude des neutrinos solaires.
c. D'après la ligne 3 du texte, le nombre de noyaux d'hélium formés est la moitié du nombre de neutrinos émis donc il est de l'ordre 5×10^{37}.
d. On fait interagir les neutrinos avec une grande quantité de matière comme l'indique la phrase « les détecteurs sont de grands réservoirs contenant des milliers de m^3 d'eau ».
Le professeur pourra faire remarquer que la probabilité d'interaction est extrêmement faible pour un seul neutrino mais le nombre de neutrinos est, lui, extrêmement grand. Cependant, le nombre d'interactions observées n'est que de quelques évènements par jour.

28. Les rayons ultraviolets A, B et C
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**
a. UV A : ce sont les ultraviolets solaires ayant les plus grandes longueurs d'onde, de 400 nm à 315 nm.
UV B : ultraviolets solaires de longueurs d'onde moyennes, de 315 nm à 280 nm.
UV C : ultraviolets solaires de courtes longueurs d'onde, de 280 nm à 100 nm.
b. Ce classement correspond à une dangerosité croissante mais à un pouvoir pénétrant dans la peau décroissant.
c. • Effets utiles :
– UV A : bronzage ;
– UV B : synthèse de la vitamine D, effets bénéfiques sur certaines pathologies de la peau ;
– UV C (avec sources artificielles) : effets germicides.
• Effets néfastes :
– UV A : vieillissement de la peau, favorisent l'apparition de cancers de la peau, dangereux pour les yeux des jeunes enfants ;
– UV B : coups de soleil, vieillissement de la peau, cancers de la peau, dangereux pour les yeux ;
– UV C : très nocifs mais n'atteignent pas le sol.
d. Les ultraviolets sont essentiellement absorbés par la couche d'ozone.
e. Les UV A sont les moins absorbés, ils représentent 95 % des ultraviolets atteignant les sols (cette proportion est due à la différence d'absorption par l'atmosphère mais aussi à la différence d'émission par le Soleil).

29. ★ Échelle de Richter
> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider.**
a. $M_2 - M_1 = \log 100 = 2$.
b. $M_2 - M_1 = \frac{2}{3} \times \log 100 = 1{,}3$.
c. $\frac{A_2}{A_1} = 1{,}0 \times 10^{4}$.
d. $\frac{\mathscr{E}_2}{\mathscr{E}_1} = 10^{\left(\frac{3}{2} \times 4\right)} = 1{,}0 \times 10^{6}$.
e. L'échelle logarithmique permet de réduire l'échelle des valeurs caractérisant les séismes possibles.

30. In English Please
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**
a. Les neutrons sont produits par interaction de particules alpha avec une cible de béryllium.
b. L'interaction des neutrons avec de la paraffine produit une émission de protons. C'est la détection de ces protons qui constitue une détection indirecte des neutrons incidents.
c. Neutrons et photons sont des particules neutres.
d. L'hypothèse d'un rayonnement gamma aboutissait au non-respect de la conservation de l'énergie.

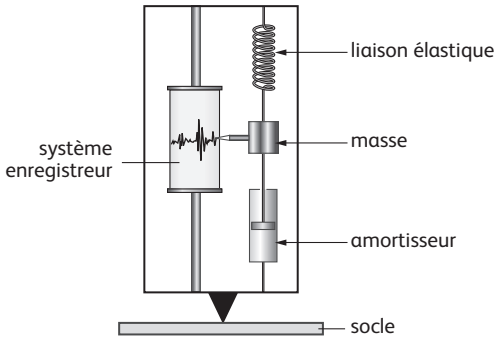
31. ★ Art et particules
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**
a. Qualités de la méthode : grande sensibilité et non destructive.
b. Il faut donner aux particules l'énergie suffisante pour interagir avec les atomes de la cible.

c. Une source radioactive ne permet pas de contrôler les énergies des particules ainsi que leur nombre.
d. On retrouve sur le graphique des pics pour les énergies des photons émis qui correspondent à celles données pour le plomb : il s'agit du massicot.

32. ★ Le sismographe

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a.



La simulation est disponible sur le site compagnon Sirius, dans le manuel numérique enrichi et à l'adresse internet suivante :
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Oscillateurs/sismo.html
b. Dans le référentiel terrestre, le socle, le cylindre et les masses sont mobiles.
c. Dans le référentiel du socle, le socle et le cylindre sont immobiles ; la masse est mobile.
d. Si l'amortissement était trop grand, la masse serait rigidement liée au support et elle serait immobile par rapport au cylindre enregistreur, on n'enregistrerait aucun signal.
e. Un sismographe doit être sensible et reproduire fidèlement le mouvement du sol (à un facteur de proportionnalité près).
f. Pour connaître complètement le mouvement d'un point du sol, il faut enregistrer les coordonnées de la position ou de la vitesse dans les trois directions de l'espace.

33. ★ La Voie lactée

> COMPÉTENCES : **S'approprier, valider, communiquer.**

a. Le personnage représente un observateur terrestre. La figure dessinée sur le cylindre représente la Voie Lactée, c'est à dire la Galaxie vue par l'observateur terrestre.
b. La bande sombre est due à des poussières intersidérales abondantes dans le plan galactique.
c. Les nuages de poussières sont bien observables en infrarouge (suivant la longueur d'onde, on peut observer le nuage lui-même ou bien les zones de la Galaxie dissimulées par celui-ci dans le domaine visible).

34. ★ S'auto-évaluer

Chaque seconde, il y a autant de neutrinos qui traversent la surface de la sphère de rayon r que de neutrinos émis. On pourra utiliser comme argument que tous les neutrinos qui sont émis à la même vitesse à un instant donné atteignent en même temps la surface de la sphère de rayon r.
Remarque : les neutrinos se déplacent tous à la vitesse de la lumière mais ceci ne constitue pas une condition nécessaire pourvu qu'on puisse admettre que l'émission se produit de façon uniforme au cours du temps.
L'émission des neutrinos se produit de façon identique dans toutes les directions, autrement dit, le nombre de neutrinos qui traversent la sphère de rayon r se répartit uniformément sur cette surface : le nombre n de neutrinos traversant la surface s en 1 seconde est proportionnel à s :

$$n = N \times \frac{s}{S}$$

en appelant S l'aire de la sphère de rayon r et N le nombre de neutrinos émis par le soleil en une seconde.

$$n = N \times \frac{s}{4\pi r^2}$$

Le calcul donne 70 milliards de neutrinos par seconde, ce qui est compatible avec la valeur annoncée, 65 milliards, compte tenu du fait que le nombre de neutrinos émis est fourni avec un seul chiffre significatif.

35. ★★ Protonthérapie

> COMPÉTENCES : **S'approprier, valider, analyser, communiquer.**

1. a. La force électrique.
b. Le proton doit être accéléré à chaque passage. Il doit donc à chaque fois se diriger le l'électrode – vers l'électrode +. Il faut que la tension change de signe à chaque traversée.
c. Le champ magnétique permet de courber la trajectoire.
d. La courbure de la trajectoire permet de faire effectuer plusieurs passages dans le champ électrique ce qui fait chaque fois gagner de l'énergie au proton.
2. a. L'énergie déposée est l'énergie que les protons cèdent à la matière environnante.
b. L'énergie déposée est utilisée pour arracher des électrons aux atomes.
c. L'énergie déposée par les protons est en grande partie déposée en profondeur là où elle est utile tandis que l'énergie du rayonnement électromagnétique diminue dès la pénétration dans le tissu. Il perd de l'efficacité pour la zone à traiter et la plus grande partie de son énergie agit sur les cellules saines.
d. L'énergie du faisceau modulé est déposée sur une plus grande épaisseur mais il y a plus d'énergie perdue sur le trajet. Le faisceau modulé pourra agir sur toute l'épaisseur de la tumeur
e. La tumeur traitée se trouve à environ 25 cm de profondeur.
f. Il faut mesurer la largeur du « plateau » : on trouve environ 3,5 cm.
3. a. Puisque le proton fournit de l'énergie au milieu traversé, son énergie diminue.
b. L'énergie du proton est due ici à sa vitesse : donc celle-ci diminue.
c. L'énergie déposée est plus grande en fin de parcours donc lorsque la vitesse est la plus faible : le pouvoir ionisant diminue si sa vitesse augmente.

36. ★★ Les détecteurs gazeux de particules

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. a. Les particules qui produisent un signal sont des particules électriquement chargées.

b. À énergies égales, le signal ne dépend pas du type de particule.

c. Les porteurs de charges sont :

– des électrons qui se dirigent vers l'électrode + ;

– des ions positifs qui se dirigent vers l'électrode –.

d. L'amplitude du signal augmente avec l'énergie de la particule.

2. a. Les chocs de la particule incidente arrachent des électrons aux atomes rencontrés.

b. Les particules produites par un choc sont accélérées par le champ électrique et peuvent à leur tour interagir avec d'autres atomes. Il y a un effet avalanche.

3. Le signal produit à chaque fois la plus grande amplitude possible. On ne peut plus distinguer les énergies.

4. a. « Le passage d'une particule à proximité d'un fil d'anode déclenche dans celui-ci un signal » : cela signifie que, si on sait repérer le fil émettant un signal, on sait aussi que, à l'instant où le signal est émis, la particule est à proximité de ce fil.

b. En combinant les informations données par plusieurs fils, on peut connaître les positions successives de la particule. En utilisant un grand nombre de fils, on peut obtenir une grande précision dans le suivi de la trajectoire.

c. On peut attendre une réponse où l'on relie l'importance du signal avec l'énergie de la particule (en réalité, la proportionnalité est entre la quantité d'électricité détectée et l'énergie de la particule).

37. La thermographie infrarouge

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

On attend ici que soient respectées les trois parties du sujet : une présentation de la méthode, un développement de l'utilisation de la thermographie dans le domaine du bâtiment et enfin une vue d'ensemble des difficultés d'interprétation d'une image thermique.

Les éléments suivants doivent apparaître dans la rédaction de la synthèse (les expressions surlignées ou une formulation équivalente sont exigibles).

Présentation de la méthode : l'élève doit montrer qu'il a compris qu'un corps, aux températures concernées, émet un **rayonnement thermique** dont la longueur d'onde du maximum d'émission **correspond à l'infrarouge et dépend de la température**. On enregistre, avec un capteur approprié, une image infrarouge des objets observés. Cette image doit être restituée en fausses couleurs, **chaque couleur correspondant à un domaine de longueur d'onde IR associé lui-même à une température.**

Application au domaine du bâtiment : la méthode est utilisée pour étudier les **déperditions d'énergie** des bâtiments en vue d'étudier la qualité de **leur isolation thermique** ou d'en réparer des défauts. On devra préciser que la méthode est aussi utilisée pour **détecter d'autres défauts** : les fuites d'eau ou de canalisations de chauffage ainsi que les défauts des circuits électriques (on pourra citer et interpréter le document 5 où l'on constate une surchauffe sur le fil central).

Difficultés d'interprétation : il existe une relation entre la température et le rayonnement thermique dans le cas idéal du « corps noir ». On doit apporter une **correction pour tenir compte de l'écart entre le comportement des matériaux avec celui du corps noir.** D'autre part, le rayonnement enregistré n'est pas uniquement constitué par le rayonnement thermique de l'objet étudié, il faut tenir compte aussi du **rayonnement provenant de l'environnement, réfléchi ou diffusé par le matériau** photographié. À ce sujet, on devra évoquer l'exemple fourni par le document 6 : l'image de la verrière ne fourni aucun renseignement sur la paroi photographiée parce que le rayonnement enregistré provient de la réflexion par le verre du ciel ou d'un mur voisin.

EXERCICES Objectif BAC

38. ANALYSE DE DOCUMENT

Télédétection par satellite

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

Le canal D détecte les longueurs d'onde comprises entre 5,7 et 7,1 µm. D'après la courbe de transmission atmosphérique en fonction de la longueur d'onde, ces longueurs d'onde ne sont pas transmises par l'atmosphère. Les longueurs d'onde reçues par ce canal ne peuvent provenir du sol terrestre.

Pour les canaux C (0,4 à 1,1 µm) et E (10,5 à 12,5 µm), les gammes de longueurs d'onde sont bien transmises du sol jusqu'au satellite sans absorption par l'atmosphère.

Le canal E détecte les longueurs d'onde comprises entre 10,5 et 12,5 µm et, d'après le document 1, renseigne sur la température des nuages et de la surface terrestre.

On cherche à déterminer la gamme de température des objets détectés par le canal E.

D'après la loi de Wien :

$$10{,}5 < \frac{2{,}90 \times 10^3}{T} < 12{,}5$$

$$\frac{2{,}90 \times 10^3}{10{,}5} > T > \frac{2{,}90 \times 10^3}{12{,}5}$$

Donc le canal E détecte des objets de températures comprises entre 232 et 276 K, c'est-à-dire entre – 41 °C et 3 °C. Cette gamme de température est faible par rapport aux températures du sol terrestre, mais semble bien adaptée à celle des nuages.

39. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Détecteur optique de mouvement

> COMPÉTENCES : **Réaliser, analyser, valider.**

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

CHAPITRE 2

OBSERVER

Caractéristiques des ondes

> Manuel pages 26 à 49

Choix pédagogiques

Ce chapitre permet de présenter les ondes progressives et d'en donner leurs caractéristiques. C'est une introduction à la notion d'onde qui sera réinvestie dans les chapitres suivants (onde sonore, diffraction, interférences et dualité onde-particule).
La découverte des ondes progressives, dans la première activité, repose sur l'étude de cas concrets (ola, impulsion se propageant le long d'un fouet, rivière, ronds à la surface de l'eau, etc.) qui permet de donner à l'élève une représentation visuelle de cette notion. Dans la deuxième activité, l'usage de la vidéo permet de mieux comprendre la propagation des ondes progressives, la notion de retard et de déterminer la vitesse de propagation d'une onde : cette étude est illustrée par l'exemple des ondes sismiques.
La formule de la vitesse de propagation est réinvestie dans une démarche d'investigation (troisième activité) dans laquelle l'élève doit proposer un montage permettant de modéliser le fonctionnement d'un télémètre à ultrasons et de l'utiliser afin de mesurer une dimension. Cette étude permet également d'aborder les questions d'incertitude sur la mesure et de faire quelques remarques sur l'influence du milieu de propagation sur la propagation des ondes.
Dans la quatrième activité, les ondes progressives sinusoïdales sont présentées à l'aide d'une cuve à ondes : la notion de périodicité dans le temps est étudiée à l'aide d'une vidéo alors que la périodicité dans l'espace est abordée à l'aide d'une photographie. Pour vérifier que les notions de longueur d'onde et de période temporelle sont bien acquises une dernière démarche d'investigation (activité 5) permet d'appliquer ces notions à la détermination de la célérité des ondes sonores.
Les connaissances acquises dans les classes antérieures sur la vitesse et la fréquence d'un phénomène périodique sont donc réinvesties dans ce chapitre.
Des animations, des vidéos et des simulations ont été créées pour illustrer ce chapitre et aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Le mascaret est une vague qui se produit lors des marées montantes et qui remonte un fleuve, ici le fleuve Severn au Royaume-Uni.

Comment les surfeurs peuvent-ils prévoir l'horaire de passage de la vague ?

La photographie des pages d'ouverture montre un phénomène naturel, le mascaret, permettant d'illustrer la notion d'onde progressive. La question est posée pour introduire la notion de retard qui sera présentée dans ce chapitre. L'observation des rides à la surface de l'eau peut permettre de réfléchir sur la notion de périodicité dans l'espace.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Définir une onde progressive

Commentaires

Cette première activité permet de présenter les ondes progressives à une dimension. L'étude de cas concrets est utilisée pour amener l'élève à proposer une définition d'onde progressive à une dimension et savoir distinguer dans son environnement des situations illustrant ce phénomène.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Un participant d'une ola se lève puis se rassoit.

ANALYSER

2. Il n'y a pas de transport de matière dans la direction de propagation au cours d'une ola. Il n'y a pas de transport de matière le long d'un fouet lorsque le dompteur donne une impulsion à ce dernier. L'énergie communiquée au fouet par le dompteur s'est propagée le long du fouet.

VALIDER

3. a. Une onde progressive est le phénomène de **propagation** d'une **perturbation** sans **transport** de **matière**, mais avec **transport** d'énergie.
b. La ola n'est pas une onde car les spectateurs ne se communiquent pas l'énergie les uns aux autres.
c. Les situations correspondant à une onde progressive à une dimension sont : (b) et (d).

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Comprendre la propagation d'une onde

Commentaires

L'exemple des ondes sismiques permet de contextualiser cette activité et d'illustrer les notions d'ondes longitudinales et transversales. L'objectif de cette activité est de déterminer la célérité d'une onde grâce à des photographies issues de vidéos. (Les vidéos, disponibles sur le site compagnon, permettent également de réaliser un pointage.)

L'étude de la propagation de l'onde le long de la corde est détaillée pour présenter une méthode de détermination de la célérité.

Un réinvestissement de la méthode est proposé pour l'étude de la propagation d'une perturbation le long d'un ressort.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Un point de la corde se déplace verticalement lors du passage de la perturbation, alors que la direction de la propagation de la perturbation est horizontale. L'onde se propageant le long de la corde est donc transversale et permet de modéliser une onde *S*.

Un point du ressort se déplace horizontalement lors du passage de la perturbation et la direction de la propagation de la perturbation est horizontale. L'onde se propageant le long d'un ressort est donc longitudinale et permet de modéliser une onde *P*.

RÉALISER

2. a. Pour déterminer la distance d parcourue entre les images 1 et 5, on reporte le point P_2 sur l'image ⓐ, puis on mesure la distance P_1P_2, soit P_1P_2 = 4,7 cm.

L'échelle du document se détermine grâce à la règle graduée :

$(102\text{ cm})_{\text{réel}}$ correspond à $(4{,}3\text{ cm})_{\text{photo}}$ et $(1\text{ cm})_{\text{photo}}$ correspond à $(23{,}7\text{ cm})_{\text{réel}}$.

$d = (P_1P_2)_{\text{réel}} = 4{,}7 \times 23{,}7 = 1{,}1 \times 10^2$ cm.

b. La durée écoulée entre les images 1 et 5 est

$$\tau = \frac{1}{30} \times 4 = 0{,}13 \text{ s}.$$

c. La vitesse de propagation ou célérité se calcule alors de la façon suivante :

$$v = \frac{d}{\tau} = \frac{1{,}1 \times 10^2 \times 10^{-2}}{0{,}13} = 8{,}5 \text{ m·s}^{-1}.$$

3. Pour déterminer la distance parcourue entre les images 1 et 5, on reporte le point P_2 sur l'image ⓐ, puis on mesure la distance P_1P_2, soit P_1P_2 = 1,5 cm.

L'échelle du document est la même que précédemment :

$(1\text{ cm})_{\text{schéma}}$ correspond à $(23{,}7\text{ cm})_{\text{réalité}}$.

$d = (P_1P_2)_{\text{réel}} = 1{,}5 \times 23{,}7 = 36$ cm.

La durée écoulée entre les images 1 et 5 est :

$$\tau = \frac{1}{30} \times 4 = 0{,}13 \text{ s}.$$

La vitesse de propagation ou célérité se calcule alors de la façon suivante :

$$\frac{d}{\tau} = \frac{36 \times 10^{-2}}{0{,}13} = 2{,}8 \text{ m·s}^{-1}.$$

RÉALISER

4. Pour déterminer la célérité des ondes sismiques, des capteurs (sismographes) sont disposés à la surface de la Terre. La mesure du retard entre différentes stations sismiques, dont on connait l'éloignement, permet de déterminer la célérité des ondes sismiques.

Remarques à propos du pointage

• Pour la corde :

Le pointage vidéo du film image par image montre que la vitesse diminue entre les images 1 et 7.

Les frottements nombreux avec le support et l'amplitude importante donnée à la corde pour que la déformation soit visible sont deux raisons pouvant justifier cette variation.

La vitesse calculée dans l'activité à partir des deux photographies est alors une vitesse moyenne entre ces deux dates.

• Pour le ressort :

La vitesse calculée à partir des deux photographies est une vitesse moyenne entre ces deux dates.

Le pointage vidéo du film est des plus délicats, et n'est plus possible après le point P_2, qui correspond à la 5e image.

Néanmoins, on retrouve l'ordre de grandeur de 2 m·s^{-1} déterminé à partir des photographies.

3. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Le télémètre à ultrasons

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guide élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

4. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
La cuve à ondes

Commentaires

Cette activité permet d'introduire les notions de périodes temporelle et spatiale en utilisant la vidéo d'une onde sinusoïdale à la surface de l'eau d'une cuve à ondes.

Un défilement image par image de la vidéo permet de déterminer la période temporelle de l'onde.

Grâce à une image extraite de la vidéo, on détermine la période spatiale (ou longueur d'onde) de l'onde sinusoïdale.

Réponses

RÉALISER

1. a. La vidéo est disponible sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

b. Il faut faire défiler 19 images pour observer le passage de 10 rides brillantes sur le point *M*.

$10\,T = 19 \times \frac{1}{30}$,

soit $T = \frac{1}{10} \times 19 \times \frac{1}{30} = 6{,}3 \times 10^{-2}$ s.

c. $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6{,}3 \times 10^{-2}} = 16$ Hz.

S'APPROPRIER

2. a. La perturbation qui se déplace dans le milieu est périodique dans l'espace, car on mesure la même distance entre deux points du milieu dans le même état vibratoire.

b. Calcul de la longueur d'onde (doc. 2) :

l'échelle du document est $(15\text{ cm})_{\text{réel}} = (4{,}5\text{ cm})_{\text{photo}}$.

$(6\lambda)_{\text{photo}} = 2{,}7$ cm,

soit $\lambda = \frac{1}{6} \times 2{,}7 \times \frac{15}{4{,}5} = 1{,}5$ cm.

5. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Mesure de la célérité du son

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guide élève et professeur sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

EXERCICES Appliquer le cours

Propagation des ondes progressives (§1 du cours)

13. Étudier une onde progressive

a. Les brindilles flottent au même endroit avant et après le passage de la perturbation.

b. Les ondes électromagnétiques émises par le Soleil nous apportent de l'énergie par transfert thermique.

14. Exploiter la célérité d'une onde

Conversion de la célérité des ondes en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$v = \frac{20}{3{,}6} = 5{,}6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Calcul de la durée nécessaire à l'onde pour parcourir une distance $d = 12$ km :

$\tau = \frac{d}{v} = \frac{12 \times 10^3}{5{,}6} = 2{,}1 \times 10^3\text{ s} = 35\text{ min }43\text{ s} = 36\text{ min}.$

Heure d'arrivée sur la commune B :

17 h 57 + 0 h 36 = 18 h 33.

Les ondes progressives sinusoïdales (§2 du cours)

15. Définir une onde sinusoïdale

a. Une onde progressive qui se propage dans une seule direction est une onde progressive à une dimension.

b. L'expression « distance crête à crête » est associée à la longueur d'onde : la plus petite distance séparant deux points du milieu présentant le même état vibratoire.

c. La période d'une onde progressive sinusoïdale est la plus petite durée pour que chaque point du milieu se retrouve dans le même état vibratoire

Pour une onde progressive sinusoïdale :

$v = \frac{\lambda}{T}$ soit $T = \frac{\lambda}{v} = \frac{40}{5{,}5} = 7{,}3$ s.

d. La fréquence correspond au nombre de périodes par unité de temps :

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{7{,}3} = 0{,}14$ Hz.

16. Exploiter des relations

Onde périodique sinusoïdale dans l'air	Fréquence f	Période T	Longueur d'onde λ
ultrason	40 kHz	25 µs	**8,5 mm**
note « La_3 »	440 Hz	**2,27 ms**	**77,3 cm**
micro-ondes	**6,0 MHz**	**0,17 ns**	5,0 cm

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{25 \times 10^{-6}} = \mathbf{40\ kHz.}$

$v = \frac{\lambda}{T}$, soit $\lambda = v \times T = 340 \times 25 \times 10^{-3} = \mathbf{8{,}5\ mm.}$

$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{440} = 2{,}27 \times 10^{-3}\text{ s} = \mathbf{2{,}27\ ms.}$

$\lambda = v \times T = 340 \times 2{,}27 \times 10^{-3} = 0{,}773\text{ m} = \mathbf{77{,}3\ cm.}$

$v = \frac{\lambda}{T}$, soit $T = \frac{\lambda}{v} = \frac{5{,}0 \times 10^{-2}}{3{,}00 \times 10^8} = 1{,}7 \times 10^{-10}\text{ s} = \mathbf{0{,}17\ ns.}$

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1{,}7 \times 10^{-10}} = 6{,}0 \times 10^9\text{ Hz} = \mathbf{6{,}0\ MHz.}$

17. Extraire et exploiter des informations

a. Le signal visualisé permet d'obtenir la valeur de la période temporelle.

b. $T = b \times n_{\text{bH}} = 500 \times 10^{-6} \times 4{,}5 = 2{,}3 \times 10^{-3}\text{ s} = 2{,}3\text{ ms}$

c. $\lambda = v \times \text{T} = 340 \times 2{,}3 \times 10^{-3} = 0{,}78\text{ m} = 78\text{ cm}$

18. Effectuer un calcul

a. Calcul de la longueur d'onde λ de l'onde progressive sinusoïdale :

$AB_{(\text{photo})} = 2{,}6\text{ cm} \rightarrow AB_{(\text{réel})} = 4{,}0\text{ cm}.$

On mesure $6\lambda_{(\text{photo})} = 4{,}0\text{ cm} \rightarrow 6\lambda_{(\text{réel})} = 4{,}0 \times \frac{4{,}0}{2{,}6} = 6{,}2\text{ cm}.$

$\lambda = \frac{6{,}2}{6} = 1{,}0\text{ cm}.$

b. Période de l'onde :

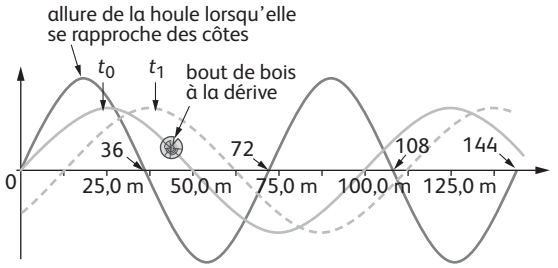
$T = \frac{1}{15} = 6{,}7 \times 10^{-2}\text{ s} = 67\text{ ms}.$

c. Calcul de la célérité de cette onde :
$v = \lambda \times f = 1{,}0 \times 10^{-2} \times 15 = 1{,}5 \times 10^{-1}$ m·s^{-1}.

EXERCICES S'entraîner

19. Exercice résolu dans le manuel

20. Application de l'exercice résolu
1. La période d'une onde ne dépend pas de son milieu de propagation, donc $T = 8{,}00$ s.
La longueur d'onde se calcule à l'aide de la formule $v = \dfrac{\lambda}{T}$ soit $\lambda = v \times T = 9{,}0 \times 8{,}00 = 72$ m.
2.



21 Exercice résolu dans le manuel

22. Application de l'exercice résolu
1. La longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux points du milieu présentant le même état vibratoire. Cette distance est quatre fois plus grande que dans l'air, soit $\lambda = 2{,}8$ cm.
2. La célérité vaut alors $v = \lambda \times f$. Sachant que la fréquence f n'est pas modifiée, on trouve :
$v_{eau} = 2{,}8 \times 10^{-2} \times 5{,}0 \times 10^{4} = 1{,}4 \times 10^{3}$ m·s^{-1}.

23. Apprendre à rédiger
> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, réaliser**.
a. La période T est la plus petite durée pour que chaque point du milieu se retrouve dans le même état vibratoire. On mesure $2T$ sur l'oscillogramme pour gagner en précision : on trouve 8 divisions, et en tenant compte de la sensibilité de la base de temps :
$2T = b \times n_H = 5 \times 10^{-6} \times 8 = 4{,}0 \times 10^{-5}$ s.
Soit $T = 2{,}0 \times 10^{-5}$ s = 20 µs.
$f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{20 \times 10^{-6}} = 5{,}0 \times 10^{4}$ Hz = 50 kHz.
b. La longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux points du milieu présentant le même état vibratoire : λ = 6,8 mm.
c. La longueur d'onde correspond à la distance parcourue par l'onde pendant une période T de la source, soit $\lambda = v \times T$, donc $v = \lambda \times f$. Le résultat sera écrit avec deux chiffres significatifs, comme les données.
A.N. : $v = 6{,}8 \times 10^{-3} \times 5{,}0 \times 10^{4} = 3{,}4 \times 10^{2}$ m·s^{-1}.

24. In English Please
> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser**.
a. Les ondes ultrasonores sont utilisées pour les radars de recul.
b. $v = \dfrac{2d}{\Delta t}$,
soit $\Delta t = \dfrac{2d}{v} = \dfrac{2 \times 0{,}35}{340} = 2{,}1 \times 10^{-3}$ s = 2,1 ms.

25. À quelle distance se trouve l'orage ?
> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, valider**.
Justification du calcul proposé :
$v = 340$ m·s^{-1} = 0,340 km·s^{-1} = $\dfrac{1}{3}$ km·s^{-1}.
$v = \dfrac{d}{\Delta t}$, soit $d = v \times \Delta t = \dfrac{1}{3} \times \Delta t$.

26. Mesure de la célérité du son
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser**.
On lit $\Delta t = 2{,}0$ ms entre les deux principaux pics.
$v = \dfrac{d}{\Delta t} = \dfrac{68 \times 10^{-2}}{2{,}0 \times 10^{-3}} = 3{,}4 \times 10^{2}$ m·s^{-1}.

27. Cuve à ondes
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider**.
L'onde est progressive sinusoïdale.
La fréquence de l'onde ne dépend pas du milieu de propagation, elle est imposée par la source.
La longueur d'onde diminue lorsque la profondeur diminue.
$$v = \lambda \times f.$$
Lorsque que la profondeur diminue, la vitesse diminue.

28. Le SOS du papillon
> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, valider**.
a. $2\lambda_{(schéma)} = 4{,}3$ cm $\rightarrow 2\lambda_{(réel)} = \dfrac{2\lambda_{(schéma)}}{2}$.
$\lambda_{(réel)} = \dfrac{4{,}3}{4} = 1{,}1$ cm.
b. Calcul de la célérité v de cette onde :
L'onde est sinusoïdale, donc
$v = \lambda \times f = 1{,}1 \times 5 = 5$ cm·s^{-1}.

29. ★ Le sonar du dauphin
> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**
a. Durée Δt_1 pour atteindre le navire :
$v_A = \dfrac{d}{\Delta t_1}$, soit $\Delta t_1 = \dfrac{d}{v_A} = \dfrac{100}{20} = 5{,}0$ s.
b. Durée Δt_2 de la réception de l'écho :
$v_B = \dfrac{2d}{\Delta t_2}$, soit $\Delta t_2 = \dfrac{2d}{v_B} = \dfrac{2 \times 100}{1{,}5 \times 10^{3}} = 0{,}13$ s.
c. En ajoutant le temps de réaction 500 ms à Δt_2, soit $500 + 1{,}3 \times 10^{2} = 6{,}3 \times 10^{2}$ ms, on trouve une durée inférieure à 5,0 s, donc le dauphin pourra éviter le navire.

30. ★ Bassin de houle

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, réaliser**.

a. $T = \dfrac{\dfrac{19 \times 1}{30}}{10} = 6{,}3 \times 10^{-2}$ s.

b. Les deux définitions possibles de la période spatiale λ d'une onde progressive sinusoïdale sont :
– la longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux points du milieu présentant le même état vibratoire ;
– la longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à la période T à la célérité v.

c. Échelle : 15 $cm_{(réel)} \rightarrow$ 5,0 $cm_{(schéma)}$.

$4\lambda_{(schéma)} = 2{,}2$ cm, soit $4\lambda_{(réel)} = 2{,}2 \times \dfrac{15}{5{,}0} = 6{,}6$ cm.

$\lambda = \dfrac{6{,}6}{4} = 1{,}7$ cm.

d. $v = \lambda \times f$, donc $\lambda = \dfrac{v}{f} = \dfrac{6}{1} = 6$ m.

$T = \dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{1} = 1$ s.

31. ★ L'ingénieur du son et la ligne de retard

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, valider**.

a. Calcul de la durée au bout de laquelle des spectateurs situés à une distance d = 150 m de la scène devraient entendre le son, si celui-ci se propage à v = 340 m·s^{-1} :

$\Delta t = \dfrac{d}{v} = \dfrac{150}{340} = 4{,}41 \times 10^{-1}$ s = 441 ms.

b. Lors de la propagation du son sur de longues distances, il y a amortissement du son.

c. L'« écho » correspond au décalage entre les sons émis par le haut-parleur proche des spectateurs et par le haut-parleur de la scène.

d. Il faut que le son de la ligne de retard soit émis quand le son des haut-parleurs de la scène arrive sur la ligne de retard, soit Δt = 441 ms.

32. ★ Un marégraphe

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. $v = \dfrac{2L}{\Delta t}$, soit $\Delta t = \dfrac{2L}{v}$.

b. $H = D - L = D - \dfrac{v \times \Delta t}{2}$.

c. H = 3,23 m à 13 h 36.

$H = D - \dfrac{v \times \Delta t}{2}$, soit $\Delta t = (D - H) \times \dfrac{2}{v} =$

$(10 - 3{,}23) \times \dfrac{2}{340} = 4{,}0 \times 10^{-2}$ s = 40 ms.

d. Le décalage entre le signal reçu et le signal émis est de 2,1 ms : Δt = 2,1 ms.

$H = 0{,}43 - \dfrac{340 \times 2{,}1 \times 10^{-3}}{2} = 7{,}3 \times 10^{-2}$ m = 7,3 cm.

33. ★★ GPS et incertitude

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, analyser, valider.**

a. Calcul de la longueur d'onde λ dans le vide des ondes émises par les satellites :

$c = \lambda \times f$, soit $\lambda = \dfrac{c}{f} = \dfrac{3{,}00 \times 10^8}{1{,}5 \times 10^9} = 2{,}0 \times 10^{-1}$ m = 20 cm.

b. Durée Δt émise par le signal pour aller du satellite S à l'altitude h = 20 180 km au récepteur R :

$c = \dfrac{h}{\Delta t}$,

soit $\Delta t = \dfrac{h}{c} = \dfrac{20\,180 \times 10^3}{3{,}00 \times 10^8} = 6{,}73 \times 10^{-2}$ s = 67,3 ms.

c. Pour une mesure unique, l'incertitude de mesure sur la distance verticale est de 20 mètres.
Calcul de l'incertitude de mesure U(Δt) sur la durée de propagation du signal :

$U(\Delta t) = \dfrac{U(d)}{c} = \dfrac{20}{3{,}00 \times 10^8} = 6{,}7 \times 10^{-8}$ ns.

L'incertitude de mesure U(Δt) est 10^6 fois plus petite que Δt. La durée Δt devra être mesurée avec une précision très importante, sinon l'incertitude sur la distance sera élevée.

d. $U'(d) = \dfrac{U(d)}{\sqrt{N}}$, soit $\sqrt{N} = \dfrac{U(d)}{U(d')}$

soit $N = \dfrac{U(d)^2}{U(d')^2} = \dfrac{20^2}{0{,}20^2} = 10 \times 10^4$

e. Calcul de la durée nécessaire pour effectuer ces N mesures :

$$1{,}0 \times 10^4 \times 1 \times 10^{-3} = 10 \text{ s.}$$

Une telle précision n'est pas possible avec un récepteur mobile à grande vitesse car il aura changé de position pendant le temps de la mesure.

34. ★★ S'auto-évaluer

Les points de la surface de l'eau correspondant aux points M et N sur l'écran sont dans le même état vibratoire. On en déduite donc la longueur d'onde de l'onde périodique :

$\lambda_{(écran)} = MN = 1{,}8$ cm $\rightarrow \lambda_{(réel)} = \dfrac{MN}{\gamma} = \dfrac{1{,}8}{1{,}7} = 1{,}1$ cm.

Calcul de la fréquence f de cette onde, la période mesurée sur l'oscillogramme correspondant à 3,6 divisions :

$$T = b \times 3{,}6 = 20 \times 3{,}6 = 72 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{72 \times 10^{-3}} = 14 \text{ Hz.}$$

Célérité v de l'onde :
$v = \lambda \times f = 1{,}1 \times 10^{-2} \times 14 = 0{,}15$ m·s^{-1} = 15 cm·s^{-1}.

35. ★★ Séisme

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, analyser.**

a. Le train d'ondes A correspond aux ondes P car elles sont plus rapides (arrivent plus tôt), et le train d'onde B correspond aux ondes S.

b. Le train d'ondes *A* arrive à *Eureka* avec un retard de 40 s, donc l'heure du séisme est
8 h 15 min 20 s – 40 s = 8 h 14 min 40 s.
c. Calcul de la distance *d* séparant l'épicentre du séisme de la station *Eureka* :

$v = \dfrac{d}{\Delta t}$, soit $d = v \times \Delta t = 10 \times 40 = 4{,}0 \times 10^2$ km.

d. $v = \dfrac{d}{\Delta t'} = \dfrac{4{,}0 \times 10^2}{66} = 6{,}1$ km·s^{-1}.

36. Acoustique des théâtres antiques

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, analyser, valider, communiquer.**

1. *Utilisation d'un émetteur ultrasonore*
Les ultrasons ont une longueur d'onde plus petite que celle du son. Il est donc intéressant de les utiliser dans le cadre de la simulation avec la maquette.
2. *Influence d'un plafond*
L'écho est plus amorti dans le cas où le couvercle est recouvert de moquette (expérience 2) que dans le cas où il n'y a pas de moquette sur le couvercle (expérience 1).
L'écho est très fortement amorti en l'absence de couvercle (expérience 3).
L'expérience 3 correspond à la situation la plus intéressante d'un point de vue acoustique, car il n'y a pas d'écho.
3. *Rôle du mur*
L'utilisation d'un mur plan n'est pas souhaitable pour la réception sonore dans les gradins, car les vaguelettes à la surface de l'eau sont moins visibles dans l'expérience 1 que dans l'expérience 2.
Elles possèdent une plus faible amplitude à certains endroits des gradins. Ainsi, l'intensité des ondes sonores reçues par les spectateurs dans les gradins est plus faible avec un mur plan qu'avec un mur alvéolé.
Le mur des théâtres antiques était orné de niches et de colonnes pour créer des alvéoles.
4. *Dimension de la scène*
Retard Δt entre l'onde sonore émise par l'orateur au point *A* et l'onde réfléchie par le mur :

$$v = \frac{2d}{\Delta t}, \text{ soit } \Delta t = \frac{2d}{v}.$$

Profondeur maximale d_{max} de la scène pour que la proclamation d'un texte reste compréhensible :

$$\Delta t < \frac{1}{25} \text{ s}$$

$$\frac{2d_{max}}{v} < \frac{1}{25}$$

$$d_{max} < \frac{1}{25} \times \frac{v}{2} = \frac{1}{25} \times \frac{340}{2} = 6{,}8 \text{ m}.$$

Les théâtres antiques extérieurs possèdent donc une acoustique remarquable, car les échos multiples qui pourraient parasiter la voix d'un orateur sont amoindris à la fois par l'absence de plafond, par le mur de scène présentant des aspérités et par des dimensions de scène convenablement choisies.

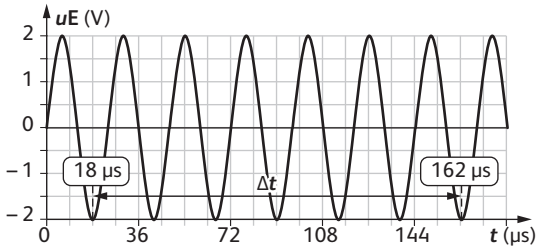
EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

37. NETTOYEUR À ULTRASONS

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. Détermination de la période T du signal représenté :
On mesure la durée Δt du plus grand nombre *N* possible de périodes :



On en déduit la période :

$T = \dfrac{\Delta t}{N} = \dfrac{162 - 18}{2} = 24$ µs $= 24 \times 10^{-6}$ s.

2. Détermination de la fréquence :

$f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{24 \times 10^{-6}} = 41\,667$ Hz que l'on arrondit à deux chiffres significatifs donc $f = 4{,}2 \times 10^4$ Hz = 42 kHz, soit une valeur en accord total avec la notice qui annonce 42 kHz.
3. a. La longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux points du milieu présentant le même état vibratoire.
b. Au départ, l'émetteur et le récepteur ont leurs signaux électriques en phase. En éloignant le récepteur d'une distance égale à la longueur d'onde λ = 8 mm, on observe à nouveau des signaux en phase.
Pour augmenter la précision de la mesure, il faut mesurer plusieurs longueurs d'onde. Pour cela, on repère plusieurs décalages successifs des signaux. La distance mesurée étant plus grande, la précision est améliorée.
c. Calcul de la célérité v des ondes ultrasonores :

$\lambda = v \times T$ donc $v = \dfrac{\lambda}{T} = \dfrac{8 \times 10^{-3}}{24 \times 10^{-6}} = 3 \times 10^2$ m·s^{-1}.

4. La fréquence d'une onde ne dépend pas de son milieu de propagation contrairement à sa célérité.
En utilisation normale, la longueur d'onde est différente car le milieu de propagation n'est pas de l'air comme dans la modélisation proposée, c'est de l'eau. D'après la formule, $v = \lambda \times f$, on peut en conclure que si la célérité de l'onde augmente, la longueur d'onde augmente.

38. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Étude d'un sondeur

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, réaliser, valider, communiquer.**

Dans les conditions de l'exercice, la salinité vaut S = 35 ‰ et la température vaut θ = 10°C. Ces conditions permettent de déterminer la vitesse de propagation du son dans l'eau.

Par lecture graphique sur le document 3, on lit $v = 1\,490$ m·s^{-1}.

D'après le document 2, la réflexion dépend de la taille du réflecteur (poisson). Pour détecter une sardine, il faut que la longueur d'onde de l'onde émise par le sondeur soit plus petite que la taille du poisson.

Une sardine mesure une quinzaine de centimètres, il faut donc que la longueur d'onde soit inférieure à 15 cm.

On détermine donc la longueur d'onde de l'onde émise par le sondeur. La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde à la célérité v durant une période T, soit

$$\lambda = v \times T = \frac{v}{f} = \frac{1\,490}{83 \times 10^3} = 1{,}8 \times 10^{-2} \text{ m} = 1{,}8 \text{ cm}.$$

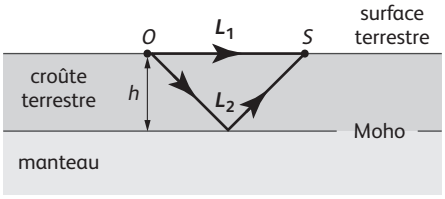
1,8 cm (longueur d'onde) est bien inférieur à 15 cm (taille d'une sardine), la réflexion des ondes ultrasonores sera donc directionnelle et le sondeur pourra les détecter.

39. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Le Moho

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, communiquer.**

La situation est représentée sur le schéma suivant :



La distance jusqu'à la carrière et la durée de propagation depuis la carrière permettent de calculer la vitesse des trains d'ondes.

Exemple : $v = \frac{d}{\tau} = \frac{10{,}0}{1{,}82} = 5{,}49$ km·s^{-1}.

Sismographe	Vitesse de propagation (km·s^{-1})
1	5,49
2	5,47
3	5,50
4	5,50

On peut alors calculer les distances parcourues par le second train d'ondes.

Exemple : $L_2 = v \times \Delta t = 5{,}49 \times 13{,}09 = 71{,}9$ km.

Sismographe	Vitesse de propagation (km·s^{-1})	L_2 (km)
1	5,49	71,9
2	5,47	77,6
3	5,50	92,0
4	5,50	116

À partir des mesures précédentes, on en déduit la profondeur h du *Moho* dans la région de tir.

D'après le théorème de Pythagore :

$$h^2 + \left(\frac{L_1}{2}\right)^2 = \left(\frac{L_2}{2}\right)^2$$

$$h^2 = \left(\frac{L_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2$$

$$h = \sqrt{\left(\frac{L_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2}$$

Exemple de calcul de la profondeur du *Moho* :

$$h = \sqrt{\left(\frac{71{,}9}{2}\right)^2 - \left(\frac{10{,}0}{2}\right)^2} = 35{,}6 \text{ km}.$$

Sismographe	Vitesse de propagation (km·s^{-1})	L_2 (km)	h (km)
1	5,49	71,9	35,6
2	5,47	77,6	35,8
3	5,50	92,0	34,9
4	5,50	116	36,6

On peut alors calculer une valeur moyenne de la profondeur du Moho :

$$h_{moy} = \frac{35{,}6 + 35{,}8 + 34{,}9 + 36{,}6}{4} = 35{,}7 \text{ km}.$$

40. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

L'écholocation chez les chauves-souris

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

CHAPITRE 3

OBSERVER

Ondes sonores

> Manuel pages 50 à 73

Choix pédagogiques

Après avoir étudié les caractéristiques et propriétés générales des ondes, ce troisième chapitre du thème « Ondes et matières » est consacré au cas particulier des ondes sonores.
Il traite de l'ensemble des contenus du programme qui se rapporte à ce thème mais il traite également de l'intensité sonore et du niveau d'intensité sonore qui trouvent naturellement leur place dans ce chapitre tout comme l'effet Doppler, historiquement mis en évidence dans le cadre de ce type d'onde.
Dans une première partie, l'accent est mis sur les qualités d'un son qui le distinguent d'un autre : l'intensité, la hauteur et le timbre. La relation entre intensité sonore et niveau d'intensité sonore est donnée et appliquée pour en saisir l'intérêt. La fréquence d'un son musical, égale à celle du fondamental, caractérise la hauteur d'un son. Cette étude permet de revenir sur les notions abordées en classe de 2de concernant la distinction entre son et ultrason. Cette première partie se termine par l'étude du timbre d'un son associé à sa composition spectrale – amplitude relative des harmoniques – et son évolution au cours du temps en relation avec la durée des transitoires d'attaque et d'extinction du son.
L'utilisation d'ondes sonores permettant de mettre en évidence l'influence du mouvement relatif de la source par rapport au récepteur sur la fréquence de l'onde, la deuxième partie de ce chapitre concerne naturellement l'effet Doppler. L'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses est établie sur un exemple simple puis exploitée dans le domaine des ondes sonores mais également dans celui des ultrasons et des ondes électromagnétiques. Une démarche expérimentale est proposée en activité pour mesurer une vitesse exploitant l'effet Doppler sur des ultrasons. La lecture de données spectrales et la manipulation du logiciel gratuit *SalsaJ* permet d'illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.
Des animations illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Ibrahim Maalouf et Matthieu Chedid en concert lors de la cérémonie des César 2015.

Quelles sont les propriétés qui différencient les sons musicaux ?

La description de la photographie doit permettre aux élèves d'aborder les qualités des sons émis par chacun des instruments qui permettent de les distinguer les uns des autres : hauteur, intensité et timbre. La discussion peut s'engager sur les caractéristiques des ondes qui leur sont associées respectivement. La fréquence peut aisément être citée (connaissance de 2de) ainsi que l'amplitude si cette notion a déjà été évoquée dans un chapitre antérieur.
L'intérêt de l'analyse spectrale peut alors être souligné pour apporter les informations utiles permettant de différencier deux sons de même hauteur, de même intensité mais de timbres différents.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
À propos d'analyse spectrale

Commentaires

Cette activité introduit l'analyse de Fourier et quelques éléments de vocabulaire liés à l'analyse spectrale d'un son : son pur, son complexe musical, fondamental et harmonique.
Elle permet :
– de comprendre les grandeurs situées en abscisse et ordonnée d'un spectre et de concevoir qu'un son musical est décomposable en une somme de sons purs ;
– de relier la hauteur d'un son à la fréquence du fondamental et le timbre d'un son à la composition spectrale et à la durée des transitoires d'attaque et d'extinction.
Les enregistrements nécessaires (voir fin du doc. 3) à l'activité sont à réaliser aux préalables. Ceux-ci peuvent ensuite être exploités sur tous les postes disposant d'un logiciel d'analyse (réalisation et exploitation à l'aide de logiciel comme *Acquisonic*, *Audacity* associé à *Regavi* et *Regressi*, *Latis pro*, etc.).

Réponses

RÉALISER

1. Affichage des courbes $u_1(t)$, $u_2(t)$ et $u(t)$.

VALIDER

2. a. Le son étudié est qualifié de son complexe car il est composé d'une somme de sons purs de fréquences différentes. Il n'est donc pas sinusoïdal.

b. La fréquence de $u(t)$ est égale à celle de $u_1(t)$. Le son pur correspondant à $u_1(t)$ est appelé le fondamental.

RÉALISER

3. a. Le spectre d'un signal est un diagramme qui représente :

– en abscisse, la fréquence de ses harmoniques ;

– en ordonnée, l'amplitude ou l'amplitude relative des harmoniques qui composent ce signal.

b. Affichage des enregistrements et spectres des sons.

COMMUNIQUER

4.

Sons	Similitudes	
	Observations	**Explications**
A et B	Même hauteur	Les deux instruments jouent la même note. Les fréquences des signaux correspondant à chacun des sons ainsi que celles des fondamentaux dans leur spectre sont les mêmes.
A (ou B) et C	Aucune	Instruments différents jouant des notes différentes avec des intensités différentes.
Sons	**Différences**	
	Observations	**Explication**
A et B	Timbre différent	Les deux instruments sont différents. Les formes des signaux sont différentes tout comme leurs compositions spectrales (amplitudes relatives des harmoniques)
A (ou B) et C	Hauteurs (et timbres) différents : C plus aigu que A (ou B)	Notes et instruments différents. Pour la différence de timbre, voir ci-dessus. Pour la différence de hauteur, la fréquence du signal (ou celle du fondamental) correspondant à A (ou B) est inférieure celle de C.

2. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
La musique du chimiste

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

3. SIMULATION
L'effet Doppler

Commentaires

Cette activité permet de découvrir et d'interpréter, grâce à une simulation simple, l'influence du déplacement relatif d'un récepteur par rapport à un émetteur d'onde sonore sur la fréquence decelle-ci selon que l'on se situe dans le référentiel de l'émetteur ou du récepteur.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. La fréquence de vibration de la source et celle du récepteur sont identiques lorsque que la source et le récepteur sont fixes l'un par rapport à l'autre.

b. D'après le document 1, la fréquence de vibration de la source et celle du récepteur sont différentes lorsque qu'ils sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, ce qui explique la différence de sensation auditive : différence de hauteur.

RÉALISER

2. La fréquence de vibration de la source est la même dans toutes les situations.

La longueur d'onde de l'onde est plus petite dans la situation ② que dans la situation ①.

La longueur d'onde de l'onde est plus grande dans la situation ③ que dans le la situation ①.

Lorsque la source se rapproche du récepteur (situation ②), la fréquence de l'onde sonore dans le référentiel lié au récepteur est plus élevée que celle de l'onde émise dans le référentiel de la source. La période de vibration captée par le récepteur est plus petite dans la situation ④ que dans la situation ①. Cette période est plus grande dans la situation ⑤ que dans la situation ①.

VALIDER

3. a. $\lambda = \dfrac{c}{f}$, la fréquence de l'onde détectée par R est donc, à l'inverse, plus grande dans la situation ② que dans la situation ①. Elle est plus petite dans la situation ③ que dans la situation ①.

$T = \dfrac{1}{f}$, la fréquence de l'onde détectée par R est donc, à l'inverse, plus grande dans la situation ④ que dans la situation ① et plus petite dans la situation ⑤ que dans la situation ①.

b. Lorsque la voiture est en mouvement, la fréquence de l'onde détectée par le groupe d'élèves est plus grande que celle qu'ils mesurent lorsque la voiture est à l'arrêt. Cette situation correspond à la situation ②. La voiture se rapproche du groupe d'élèves.

c.

$$\frac{f_2 - f_1}{f_1} = \frac{v}{c} \Rightarrow v = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \times c$$

$$\Rightarrow v = \frac{403 - 395}{395} \times 340 = 6{,}89\ \text{m·s}^{-1} = 24{,}8\ \text{km·h}^{-1}.$$

4. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Une expérience historique

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

5. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
L'effet Doppler en astrophysique

Commentaires

Cette activité propose de mesurer un décalage Doppler de longueur d'onde subit par une raie d'absorption de la lumière provenant de Jupiter.
Le facteur 2 dans la relation provient du fait que la lumière est produite par le Soleil puis diffusée par Jupiter. Compte tenu de l'effet conjugué du mouvement relatif de Jupiter par rapport au Soleil et par rapport à la Terre, il s'en suit un double effet Doppler qui accentue le décalage au lieu de le compenser.
Le spectre étudié est celui communiqué par un astronome amateur. Le logiciel gratuit *SalsaJ* permet d'étalonner simplement l'échelle du spectre et de déterminer la valeur de longueur d'onde associée à une raie.
Une fiche technique du logiciel (ci-après) est mise à disposition de l'élève.

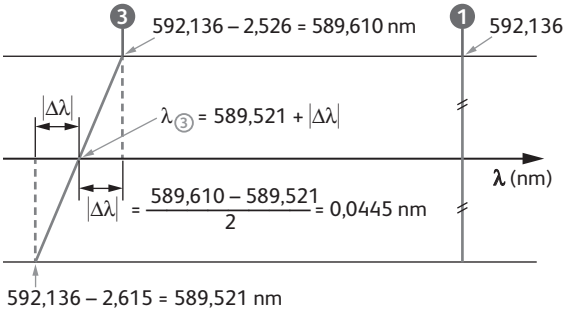
Réponses

RÉALISER

1. Écart en longueur d'onde entre la raie ① et la bordure supérieure de la raie ③ : $L_1 = 2{,}526$ nm.
Écart en longueur d'onde entre la raie ① et la bordure inférieure de la raie ③ : $L_2 = 2{,}615$ nm.

VALIDER

2. Les longueurs d'onde augmente de gauche à droite : $\lambda_③ < \lambda_①$.
À partir de la valeur numérique de la longueur d'onde de la raie ① et des résultats trouvés ci-dessus : $L_1 = 2{,}526$ nm et $L_2 = 2{,}615$ nm ; on calcule les longueurs d'onde minimale, maximale et au centre de la raie ③.



Le décalage Doppler de longueur d'onde entre la bordure supérieure (ou inférieure) d'une raie et son centre est :

$$|\Delta\lambda| = 0{,}0445 \text{ nm}.$$

La longueur d'onde au centre de la raie ③ est :
$\lambda_③ = 589{,}521 + |\Delta\lambda| = 589{,}521 + 0{,}0445 = 589{,}5655$ nm.

On laisse tous les chiffres pour ce calcul intermédiaire.

Ainsi : $v = \dfrac{|\Delta\lambda|\, c}{2\lambda_3} = 1{,}13 \times 10^4 \text{ m·s}^{-1}$.

Et : $T = \dfrac{2\pi R}{v} = \dfrac{2\pi \times 71{,}5 \times 10^6}{1{,}13 \times 10^4} = 4{,}0 \times 10^4$ s.

D'après le texte, T = 9 h 55 min = $3{,}57 \times 10^4$ s. L'écart relatif de 12 % entre ces deux valeurs s'explique par les erreurs de mesures, mais également par le fait que l'on ne bénéficie pas d'informations suffisamment précises (manque de contraste) en bordure du spectre.
Cette erreur systématique entraîne une réduction de la largeur du spectre exploitable. La fenêtre d'analyse n'est donc pas située exactement sur le bord de la planète (pas assez de signal ici).
Ainsi, la valeur de $|\Delta\lambda|$ que l'on a mesurée est plus faible que celle que l'on pourrait mesurer avec un spectre exploitable sur une plus large étendue. En conséquence, la valeur de v que l'on obtient est trop faible et celle de T est trop forte : l'élimination de cette erreur systématique diminuerait l'écart relatif.

Fiche technique du logiciel SalsaJ (traitement d'image)

• Quelques boutons et fonctions associées :

				
Ouvrir un fichier image	Annuler la dernière opération	Tracer un trait	Zoom avant/ arrière	Déplacement dans le cadre de l'image

Pour ouvrir un fichier image :
1. « Fichier » puis « Ouvrir » ou cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus).
2. Rechercher le fichier en se déplaçant dans l'arborescence.
3. Cliquer sur le fichier désiré puis « Ouvrir ».

Pour étalonner l'échelle d'une image :
1. Tracer un trait entre deux points séparés d'une distance connue. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
2. Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Indiquer l'échelle… ».
3. Compléter ou modifier les informations dans la fenêtre qui apparaît, cocher « Global » puis cliquer « OUI ».

Pour obtenir le graphe donnant l'intensité des pixels d'une image le long d'une ligne :
1. Tracer un trait le long de la ligne désirée. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
2. Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Coupe ».
3. Déplacer le pointeur sur le graphe qui apparait pour accéder aux coordonnées des points.

4. Cliquer sur le bouton « Liste » dans la fenêtre du graphique permet d'accéder aux cordonnées de chaque pixel de la ligne tracée.
Remarque : la valeur de l'abscisse tient compte de l'étalonnage de l'échelle de l'image si celui-ci a été réalisé au préalable.

EXERCICES Appliquer le cours

Propriétés des ondes sonores (§1 du cours)

13. Déterminer une intensité sonore

$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$.

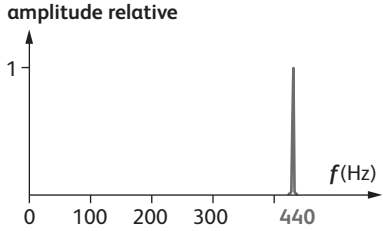
Ainsi $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$.

A.N. : $I = 10^{-12} \times 10^{\frac{140}{10}} = 1 \times 10^2$ W·m^{-2}.

14. Relier le timbre d'un son à un oscillogramme

a. La forme du signal est différente dans ces oscillogrammes : les timbres sont bien différents.

b. Le son émis par un diapason est pur, son spectre a l'allure suivante :



Remarque : la valeur de la fréquence peut être calculée avec l'indication de la sensibilité (1 ms/div en bas à droite de l'écran) :
$4 \times T = 9$ ms $\rightarrow f = 4{,}4 \times 10^2$ Hz.

15. Analyser un spectre et un enregistrement

L'enregistrement est périodique mais la forme de la courbe n'est pas une sinusoïde. Elle correspond donc à un son complexe, ce qui est en accord avec le spectre correspondant qui comporte plusieurs harmoniques, en l'occurrence quatre (le spectre correspondant à un son pur ne comporterait que le fondamental).
Déterminons le plus précisément possible la valeur de la fréquence du fondamental du son sur le spectre.
On mesure 6,8 cm pour $f = 1\,000$ Hz et 7,15 cm pour le quatrième harmonique $f_4 = 4f_1$, soit :

$f_1 = \frac{7{,}15 \times 1\,000}{4 \times 6{,}85} = 261$ Hz ; $f_1 = \frac{11{,}3 \times 1\,000}{4 \times 10{,}8} = 262$ Hz.

La fréquence du son, égale à celle de son fondamental, est 261 Hz.
Sur l'enregistrement, on mesure 8T pour 30 ms, soit :

$T = \frac{30{,}0}{8} = 3{,}75$ ms ; $T = \frac{13{,}25 \times 35{,}0}{9 \times 13{,}7} = 3{,}76$ ms,

ce qui correspond pour le son à une fréquence de :

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3{,}75 \times 10^{-3}} = 267$ Hz

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3{,}76 \times 10^{-3}} = 266$ Hz.

Vérifions que les deux valeurs de fréquence sont compatibles :

$\left|\frac{267 - 261}{267}\right| = 3\ \%$ $\left|\frac{266 - 262}{266}\right| = 1{,}5\ \%$ environ.

L'écart relatif est faible et s'explique en partie par les erreurs de pointage et lecture. On en déduit que ces deux valeurs sont compatibles.

16. Extraire et exploiter des informations

a. La forme du signal n'est pas sinusoïdale. Le son n'est donc pas pur.

b. $2T \Leftrightarrow n_H = 6$ div : $T = \frac{6 \times 1}{2} = 3{,}0$ ms.

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3{,}0 \times 10^{-3}} = 3{,}3 \times 10^2$ Hz

La guitare est accordée sur la note Mi_3.

17. Comprendre le rôle du timbre d'un son

Le timbre d'un son est lié non seulement à sa composition spectrale mais à l'évolution decelle-ci au cours du temps. Sur un enregistrement, deux sons de timbres différents ont alors des formes différentes et des durées de transitoires d'attaque et d'extinction différentes. C'est le cas de chaque note sur les enregistrements ⓐ et ⓑ. En retournant chacune des notes, la hauteur reste inchangée (le logiciel ne modifie pas la fréquence de chaque note) mais il « remplace » l'attaque par l'extinction de la note en la retournant. Ainsi, dans le cas de l'enregistrement ⓐ (piano) par exemple, les phases extinctions de chaque note sont longues relativement à celles des notes sur l'enregistrement ⓑ qui sont devenues très courtes lors du retournement d'où la différence de timbre.

Effet Doppler (§2 du cours)

18. Effectuer un calcul

a. Si la voiture se rapproche de l'auto-stoppeur fixe :

$v_R = 0$ m·s^{-1} et $f_R = \frac{v}{v - v_E} f_E$.

A.N. : $v_E = 90$ km·h^{-1} $= \frac{90{,}0 \times 10^3}{3\,600} = 25{,}0$ m·s^{-1} alors,

$f_R = \frac{340}{340 - 25{,}0} \times 400 = 432$ Hz.

b. Si la voiture s'éloigne de l'autostoppeur :

$f_R = \frac{v}{v + v_E}$; $f_E = \frac{340}{340 + 25{,}0} \times 400 = 373$ Hz.

c. La variation relative de la fréquence est au minimum de 13,5 %, ce qui est supérieur à l'écart de 6 % correspondant à un demi-ton entre deux notes. La différence est perceptible.

EXERCICES S'entraîner

19. Exercice résolu dans le manuel

20. Application de l'exercice résolu

1. Le son est complexe car le spectre traduit, par la présence de plusieurs bâtons, celle de plusieurs harmoniques.

2. La fréquence du fondamental caractérise la hauteur du son. Étant de 220 Hz, la note à attribuer au son est un La_2.

3. La forme de la courbe n'est pas une sinusoïde. Elle correspond donc à un son complexe, ce qui est en accord avec le spectre correspondant qui comporte plusieurs harmoniques et non un seul.

Sur l'enregistrement, on mesure 2,55 cm pour 15 ms et 2,8 cm pour 4*T*, soit :

$$T = \frac{2{,}8 \times 15}{4 \times 2{,}55} = 4{,}1 \text{ ms ;}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4{,}1 \times 10^{-3}} = 2{,}4 \times 10^{2} \text{ Hz.}$$

L'écart est de 9 % entre les valeurs de fréquence mais les erreurs de pointage et de lecture sont importantes au regard de la taille de l'enregistrement et de celle des graduations. L'enregistrement pourrait correspondre au spectre.

21. Exercice résolu dans le manuel

22. Application de l'exercice résolu

1. Ce décalage de fréquence s'explique par l'effet Doppler : l'émetteur et le récepteur se déplaçant l'un par rapport à l'autre, la fréquence de l'onde dans le référentiel de la source est différente de celle de l'onde détectée dans le référentiel du récepteur : $f_{\text{récepteur}} \neq f_{\text{source}}$.

2.

$$v = -\frac{c\Delta f}{v} = -\frac{3{,}00 \times 10^{8} \times (-13{,}0 \times 10^{3})}{2 \times 34{,}7 \times 10^{9}} = 56{,}2 \text{ m·s}^{-1}$$

$v = 56{,}2 \times 3{,}6 = 202$ km·h^{-1}.

3. $f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}} + \Delta f$ et $\Delta f < 0$ implique : $f_{\text{récepteur}} < f_{\text{source}}$.

Le décalage est donc négatif car la balle s'éloigne du pistolet radar.

23. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

a. Le son 1 est émis par un diapason. C'est un son pur. Son spectre ne contient que le fondamental et prend donc la forme d'un diagramme ne présentant qu'un seul bâton. Le spectre du haut est donc celui du son 1.

La fréquence du fondamental du spectre du milieu est de 110 Hz. Ce spectre correspond au son émis par la corde 2 à vide accordée sur la note *La*. Ce spectre est donc celui du son 2.

En appuyant sur la corde 6, le musicien produit un son plus aigu donc de fréquence supérieure à celle de la note *Mi* « aigu » donc supérieure à 330 Hz. La fréquence du fondamental sur le dernier spectre correspond à cela puisqu'elle est égale à 440 Hz.

b. La fréquence du fondamental du son 1 et celle du son 3 sont égale : $f = 440$ Hz. Ces sons se distinguent par leur composition spectrale ; le son 3 présente des harmoniques contrairement au son 1 qui ne contient que le fondamental. Les sons 1 et 3 se distinguent donc par leur timbre.

La fréquence du fondamental du son 2 et celle du son 3 sont différentes : $f = 440$ Hz pour le son 3 et $f' = 110$ Hz pour le son 2. Les sons 2 et 3 ont des hauteurs différentes. Ces sons se distinguent également par leur timbre puisque les compositions spectrales sont différentes : l'amplitude relative des harmoniques n'est pas la même d'un spectre à l'autre. On peut citer l'harmonique de rang 3 dont l'amplitude relative est proche de 0 pour le son 2 et proche de 1 (100 %) pour le son 3.

c. Les sons 2 et 3 ont des hauteurs différentes : le son 2, de fréquence plus faible, correspond à un *La* plus grave que le son 3.

24. Radar

> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider.**

a. Pour $v = 98$ km·h^{-1} :

$$|\Delta f| = \frac{2v\cos\alpha}{c} \times f = \frac{2\dfrac{98}{3{,}6}\cos 25}{3{,}00 \times 10^{8}} \times 34{,}0 \times 10^{9}$$

$|\Delta f| = 5{,}6 \times 10^{3}$ Hz $= 5{,}6$ kHz.

Pour $v = 90$ km·h^{-1} : $|\Delta f| = 5{,}1$ kHz.

b. Avec $\alpha = 9{,}0°$ au lieu de 25° pour $v = 90$ km·h^{-1} :

$$|\Delta f| = \frac{2\dfrac{90}{3{,}6}\cos 9{,}0}{3{,}00 \times 10^{8}} \times 34{,}0 \times 10^{9} = 5{,}6 \text{ kHz.}$$

Cette valeur est identique à celle obtenue pour $v = 98$ km·h^{-1} avec un radar correctement réglé. Bien que l'automobiliste ne dépasse pas la limite de vitesse autorisée, le radar incorrectement positionné peut déclencher la prise de vue et relever, à tort, une infraction.

25. In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. $\lambda' > \lambda$ donc il s'agit bien d'un décalage vers les radiations de longueur d'onde plus élevée donc vers le rouge : l'astronome a raison de conclure à un « redshift ».

b. $\lambda' > \lambda \Leftrightarrow f' < f$ soit $f_{\text{récepteur}} < f_{\text{source}}$: l'étoile s'éloigne de l'observateur.

c. $\dfrac{\Delta\lambda}{\lambda} = \dfrac{v}{c} \Leftrightarrow$

$$v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3{,}00 \times 10^{8} \times (656{,}315 - 656{,}285) \times 10^{-9}}{656{,}285 \times 10^{-9}}$$

$v = 1{,}37 \times 10^{4}$ m·s^{-1}.

26. Quatuor d'instruments

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser.**

a. La propriété commune à ces deux sons correspondant à la même note est la hauteur. La grandeur physique associée est la fréquence.

b. Les figures ⓐ et ⓒ correspondent à des instruments jouant la même note puisque la durée d'un motif élémentaire ou période est la même ($T = 7{,}5$ ms) donc la fréquence f est la même.
Les formes des signaux sont différentes. La caractéristique qui permet de distinguer ces deux sons est le timbre.
c. Pour le son ⓑ, $2T = 7{,}5$ ms :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{2}{7{,}5 \times 10^{-3}} = 2{,}7 \times 10^{2} \text{ Hz}.$$

La fréquence du fondamental est donc :

$$f_1 = f = 2{,}7 \times 10^{2} \text{ Hz}.$$

Celles des quatre harmoniques suivants sont :

$$f_2 = 2f_1 = 5{,}4 \times 10^{2} \text{ Hz} ;$$
$$f_3 = 3f_1 = 8{,}1 \times 10^{2} \text{ Hz} ;$$
$$f_4 = 4f_1 = 1{,}1 \times 10^{3} \text{ Hz} ;$$
$$f_5 = 5f_1 = 1{,}4 \times 10^{2} \text{ Hz}.$$

d. Pour un son de même hauteur (même fréquence fondamentale) joué par des instruments différents, la différence est liée au spectre de chaque son (nombre et répartition des harmoniques différents) et à l'évolution dans le temps, propre à chaque instrument.

27. Concert et niveau sonore

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$.

Ainsi, $I_1 = I_0 \times 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{70}{10}} = 1 \times 10^{-5}$ W·m^{-2}.

De même, $I_2 = 4 \times 10^{-5}$ W·m^{-2}.

Remarque : cette question est l'occasion d'attirer l'attention sur la règle concernant les chiffres significatifs. La présence du logarithme ou de la puissance de 10 entraîne une réflexion au cas par cas.

Exemple : un écart de 1 dB sur le niveau $L_2 = 76$ dB correspond à une imprécision de $\frac{1}{76} = 1{,}3$ %, ce qui est raisonnable pour les deux chiffres significatifs donnés.

Pour la valeur $L_2 = 75$ dB, on obtiendrait :
$I_2 = 10^{-12} \times 10^{7{,}5} = 3{,}2 \times 10^{-5}$ W·m^{-2} ; l'écart relatif entre les deux valeurs de I_2 est de l'ordre de 25 %, ce qui justifie le choix de ne garder qu'un chiffre significatif aux valeurs de I ainsi calculées.

b. $L = 10 \log\left(\frac{I_1 + I_2}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{5 \times 10^{-5}}{10^{-12}}\right) = 77$ dB.

c. En notant n le nombre de violons, $L_1 = 70$ dB étant le niveau sonore mesuré pour un seul violon et $L_n = 90$ dB étant celui correspondant à n violons :

L_n : $10 \log \frac{nI_1}{I_0}$ donc $\frac{L_n}{10} = \log \frac{nI_1}{I_0}$ soit $10^{\frac{L_n}{10}} = \frac{nI_1}{I_0}$.

Soit, $n = \frac{I_0 \times 10^{\frac{L_n}{10}}}{I_1} = \frac{10^{-12} \times 10^{\frac{90}{10}}}{1 \times 10^{-5}} = 1 \times 10^{2}$.

En multipliant le nombre de violon par cent, on augmente le niveau sonore de 20 dB.

28. ★ Rotation du noyau d'une galaxie

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. O se rapprochant de l'observateur terrestre :
$f_{\text{récepteur}} > f_{\text{source}}$ et donc $\lambda_{\text{récepteur}} < \lambda_{\text{source}}$
La partie correspondant à O est donc décalée vers les courtes longueurs d'onde. La partie supérieure de la raie correspond à O. Celle du centre, qui ne subit donc pas de décalage, correspond à S car ce point n'a pas de mouvement relatif par rapport à la terre suivant la direction de visée : $f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}}$.

b. La raie en bordure supérieure est décalée de 3 pixels vers la gauche ($\lambda' < \lambda$) : ainsi, le décalage de longueur d'onde est telle que :

$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ avec $\Delta\lambda = -3 \times 0{,}099 = 0{,}30$ nm
$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 658{,}4 - 0{,}30 = 658{,}1$ nm.

c. $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow$

$$v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3{,}00 \times 10^{8} \times 0{,}30 \times 10^{-9}}{658{,}4 \times 10^{-9}} = 1{,}4 \times 10^{5} \text{ m·s}^{-1}.$$

29. ★ Flûte traversière et synthétiseur

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

Remarque préalable : la valeur mesurée du mesurande X est notée x et son incertitude absolue $U(X)$ de sorte que $X = x \pm U(X)$ d'où la notation $U(F_1)$ pour l'incertitude absolue de la fréquence dont la valeur mesurée est f_1. $U(x)$ et donc $U(f_1)$ sont des notations considérées comme correctes également.

1. a. $3T_1 = 3{,}4$ ms soit,

$$T_1 = \frac{3{,}4}{3} = 1{,}13 \text{ ms}$$

et $f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{3}{3{,}4 \times 10^{-3}} = 8{,}82 \times 10^{2}$ Hz.

L'axe des abscisses est gradué toutes les 0,5 ms. L'incertitude-type sur la mesure de $3T_1$ peut être estimée à :

$$s = \frac{0{,}5}{\sqrt{2}} = 0{,}14 \text{ ms}.$$

Ainsi, sans tenir compte de l'incertitude élargie :

$$U(T_1) = \frac{0{,}14}{3} = 0{,}047 \text{ ms}$$

que l'on arrondie à 0,05 ms.

Or : $\frac{U(T_1)}{T_1} = \frac{U(F_1)}{f_1}$

soit $\frac{U(F_1)}{f_1} = \frac{U(T_1)}{T_1} \times f_1 = \frac{0{,}047}{1{,}13} \times 8{,}82 \times 10^{2} = 0{,}37 \times 10^{2}$Hz

arrondi à $0{,}4 \times 10^{2}$ Hz.

Finalement, on peut écrire :
$T_1 = 1{,}13 \pm 0{,}05$ ms et $f_1 = (8{,}8 \pm 0{,}4) \times 10^{2}$ Hz.

b. Un encadrement de la valeur de la fréquence f_1 du fondamental est :

$$0{,}75 \text{ kHz} \leqslant f_1 \leqslant 1{,}0 \text{ kHz}.$$

La valeur donnée en **1. a.** est comprise dans cet intervalle.
Valeurs approchées des harmoniques de rang 2 et 3 :

$$f_2 \approx 1{,}7 \text{ kHz et } f_3 \approx 2{,}5 \text{ kHz}.$$

c. $f_2 = 2f_1 = 2 \times 8{,}8 \times 10^2 = 1{,}8 \times 10^3$ Hz $\approx$ 1,7 kHz.
De même, $f_3 = 3f_1 = 2 \times 8{,}8 \times 10^2 = 2{,}6 \times 10^3$ Hz $\approx$ 2,5 kHz.

2. a. Les signaux ont même fréquence (même période) ce que confirme la lecture des spectres : la fréquence du fondamental est la même sur les figures ⓑ et ⓓ. La hauteur du son est identique dans les deux cas.

b. Les formes des signaux sont différentes, ce que confirme la lecture des spectres : les compositions spectrales sont différentes. Par exemple, l'amplitude de l'harmonique de rang 3 est d'environ 0,4 sur le spectre ⓑ et de 0,1 sur le spectre ⓓ.
Les sons se distinguent par leur timbre.

30. ★★ **S'auto-évaluer**

Choix des raies pour déterminer l'échelle du spectre
Les raies *a* et *g* sont à utiliser comme référence pour obtenir une échelle du spectre la plus précise possible.
Construction d'un tableau de proportionnalité

Distance sur le papier	Différence de longueur d'onde en réalité
entre les raies de référence $d_0 = 48{,}5$ mm	entre les raies de référence $\Delta\lambda_0 = 112{,}7$ nm
correspondant au décalage Doppler subi par la raie K, matérialisé par la flèche $d = 36$ mm	correspondant au décalage Doppler de longueur d'onde recherché $\Delta\lambda = ?$

Exploitation pour déterminer le décalage Doppler de longueur d'onde
Ainsi :

$$\Delta\lambda = \frac{d \times \Delta\lambda_0}{d_0} = \frac{36 \times 112{,}7}{48{,}5} = 84 \text{ nm}.$$

Calcul de la vitesse de la galaxie

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow$$

$$v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3{,}00 \times 10^8 \times 84 \times 10^{-9}}{396{,}85 \times 10^{-9}} = 6{,}3 \times 10^7 \text{ m·s}^{-1}.$$

La galaxie Hydra s'éloigne avec une vitesse de valeur :

$$v = 6{,}3 \times 10^7 \text{ m.s}^{-1}.$$

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

31. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

L'expansion de l'Univers

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

1. D'après le document 1, si le corps s'éloigne alors la fréquence de l'onde diminue. Or, la fréquence caractérise la hauteur d'un son. Ainsi, si la source sonore s'éloigne, la hauteur du son est plus faible et le son est perçu plus grave que lorsque la source est immobile.

2. Le document 2 montre que la raie d'hydrogène de la galaxie possède une plus grande longueur d'onde que celle obtenue au laboratoire. La longueur d'onde étant ainsi décalée vers le rouge, la galaxie NGC 3627 s'éloigne de la Terre.

3. À partir des résultats de ces mesures, Hubble trace le graphique représentant l'évolution de la vitesse d'éloignement en fonction de la distance Terre-galaxie. Il constate que ce graphe peut être modélisé par une fonction linéaire du type $v = k \times d$. Cette relation se traduit sur le graphe par une droite passant par l'origine et indique une proportionnalité en v et d.

4. Le document 4 met en évidence une évolution linéaire de la vitesse radiale v en fonction de la distance à la Terre. Les points s'alignent suivant une droite passant par l'origine avec une faible dispersion. On peut écrire $v = H_0 \times d$ avec H_0 constante de Hubble égale au coefficient directeur de la droite moyenne passant au plus près de tous les points expérimentaux.
Les résultats obtenus en 1996 valide la loi de Hubble ce qui est plus difficile à affirmer en 1929 avec une dispersion plus importante.
Détermination de la valeur de H_0 :

$$H_0 = \frac{v_A - v_O}{d_A - d_O}.$$

Avec les résultats de 1929 :

$$H_0 = \frac{1\,000 - O}{2{,}0 - O} = 5{,}0 \times 10^2 \text{ km·s}^{-1}\text{·Mpc}^{-1}.$$

Avec les résultats de 1996 :

$$H_0 = \frac{25\,000 - O}{400 - O} = 6{,}25 \times 10^1 \text{ km·s}^{-1}\text{·Mpc}^{-1}.$$

Les valeurs sont nettement différentes mais la seconde série de mesures est plus précise en se reposant sur davantage de points et des distances plus grandes.
La valeur de la constante de Hubble déterminée en 1996 est bien **plus faible** que celle déterminée en 1929.

32. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

Détection d'exoplanètes par la méthode des vitesses radiales

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, valider, communiquer.**

Rédiger une synthèse de documents (ou de connaissances) consiste à extraire des informations de documents ou de connaissances et à les mettre en relation pour répondre à une problématique.
La rédaction d'une synthèse ne fait pas appel à d'autres sources, comme le dictionnaire ou Internet. Les documents, le cours et la culture générale suffisent à sa rédaction.

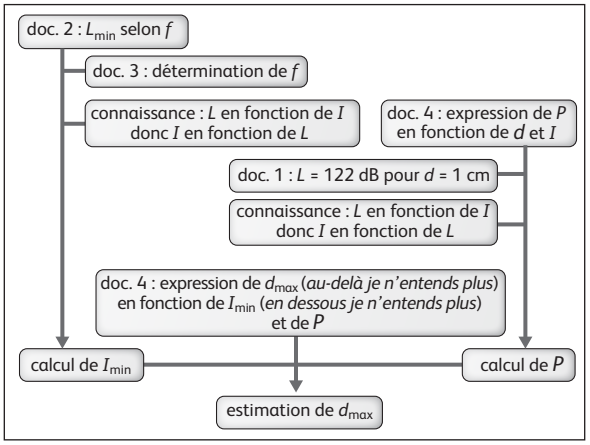
Éléments attendus	Exemples	
Contexte	a) Deux difficultés pour la détection directe, limites d'autres méthodes	Doc. 1 : petite taille et faible luminosité par rapport à l'étoile. Doc. 2 : une méthode des transits qui ne permet de détecter que de rares exoplanètes ; celles qui passent exactement entre leur étoile et l'observateur, ce qui est rare. La majorité des détections des exoplanètes s'effectue grâce à la méthode des vitesses.
Problématique posée (voire annonce de plan)	b) Problématique	Expliquer comment l'effet Doppler permet de mettre en évidence la présence d'une exoplanète autour d'une étoile.
Mise en relation d'informations extraites des documents et de connaissances	c) Observation concernant la vitesse radiale (doc. 3) et la position de raies (doc. 4). Interprétation en utilisant le document 5 et les connaissances	Doc. 3 : évolution périodique de *v*. Doc. 4 : déplacement des raies d'absorption dans un sens puis dans l'autre. Doc. 5 : mouvement circulaire de la source par rapport au récepteur. Connaissances : La mesure du décalage Doppler de longueur d'onde permet de calculer la valeur *v* de la vitesse radiale de l'étoile dans la direction de visée. Le caractère périodique de l'évolution de *v* peut être associée au mouvement de révolution de l'étoile, causée par la présence d'une exoplanète en révolution périodique autour d'elle. Celle-ci s'éloigne et se rapproche périodiquement de l'observateur. Il en decoule, par effet Doppler, un décalage périodique de longueur d'onde.
Conclusion	d) Éléments permettant de détecter la présence de l'exoplanète. Regard critique (limites de la méthode).	La présence d'une exoplanète peut se manifester, du fait de l'effet Doppler, par un décalage périodique de longueur d'onde des raies d'absorption dans le spectre de la lumière de l'étoile autour de laquelle gravite l'exoplanète. La détection n'est réalisable que si le décalage est mesurable. Elle sera donc facilitée pour une exoplanète : – suffisamment massive et proche de son étoile pour en modifier le mouvement de façon significative ; – qui évolue dans un plan proche de l'axe de visée puisque seule la vitesse de l'étoile suivant cet axe est mesurée.
Rédaction	Structure	Introduction avec éléments a) et b) Développement avec éléments c) Conclusion avec d)
	Extraction des informations :	
	pertinence	Absence d'information non nécessaire et place correcte de l'information utile dans l'argumentation.
	exactitude	Pas de déformation de l'information (ne pas lui faire dire autre chose et encore moins le contraire).
	intégralité	Toutes les informations à extraire sont présentes.
	expression	Orthographe, formulation, argumentation, paraphrase évitée (ou copier/coller), concision (30 lignes max).
	lien	Liaison logique entre les différentes parties et mise en relation des informations pour répondre à la problématique.
	réponse à la problématique	Réponse claire mettant en évidence la compréhension du sujet traité.

33. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Corne de brume

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

Ci-contre, un diagramme présentant les éléments d'une démarche possible.



Exemple de rédaction de démarche de résolution

Estimons la distance maximale à laquelle le son de la corne de brume peut être entendu.

• Déterminons déjà la fréquence du son émis par la corne de brume.

$6T = 1{,}281 - 1266 = 0{,}015$ s soit $T = 0{,}0025$ s $= 2{,}5$ ms

$\Rightarrow f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{0{,}0025} = 400$ Hz.

• Recherchons le niveau d'intensité sonore minimal requis pour que le son de la corne de brume soit entendu.

Graphiquement, $L_{min} = 10$ dB pour $f = 400$ Hz.

• Exprimons l'intensité en fonction du niveau d'intensité sonore.

$$L = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ soit } \frac{L}{10} = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ et donc}$$

$$10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0} \text{ soit } I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}.$$

• Calculons alors l'intensité sonore minimale pour l'audition à la fréquence du son.

$I_{min} = I_0 \times 10^{\frac{L_{min}}{10}}$.

A. N. : $I_{min} = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{10}{10}} = 1{,}0 \times 10^{-11}$ W·m^{-2}.

• Recherchons la puissance de la source.

$I = \dfrac{P}{4\pi d^2} \Rightarrow P = I \times 4\pi \times d^2$.

Or pour $d = 1$ cm, $L = 122$ dB soit

$I = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{122}{10}} = 1{,}6$ W·m^{-2}.

Donc $P = 1{,}6 \times 4 \times \pi \times (1 \times 10^{-2})^2 = 2 \times 10^{-3}$ W.

• Apportons une solution au problème.

$I = \dfrac{P}{4\pi d^2} \Rightarrow I_{min} = \dfrac{P}{4\pi \cdot d_{max}^2} \Rightarrow d_{max}^2$

$= \dfrac{P}{4\pi \times I_{min}} \Rightarrow d_{max} = \sqrt{\dfrac{P}{4\pi \times I_{min}}}$

$\Rightarrow d_{max} = \sqrt{\dfrac{2 \times 10^{-3}}{4\pi \times 1{,}0 \times 10^{-11}}} = 4 \times 10^3$ m soit 4 km.

• Conclusion

Le son produit par la corne de brume peut être perçu à 4 km environ.

Toutefois, la puissance peut diminuer à mesure que l'on s'éloigne de la source : dissipation d'énergie $\Rightarrow$ amortissement $\Rightarrow d_{max}$ est sans doute plus petite.

En outre, $d = 1$ cm est un ordre de grandeur. Il est possible que le microphone soit plus loin. Si $L = 122$ dB à 10 cm, on aboutirait à $d_{max} = 4 \times 10^2$ m. Ceci renforce l'idée que d_{max} est certainement plus petite.

Le descriptif indique 3 km, ce qui fait 33 % d'écart par rapport à 4 km mais l'écart se réduit avec d_{max} plus petite.

La source n'est certainement pas isotrope ce qui par contre augmente d_{max} dans la direction d'émission du son. Par contre, des bruits ambiants peuvent gêner la perception du son tout comme le vent qui peut perturber la propagation.

En conclusion, d_{max} est probablement de l'ordre du km voir de quelques centaines de mètres. L'indication du fabricant est peut-être même un peu trop élevée.

Il n'en demeure pas moins que le son sera perçu sur une longue distance.

34. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Souffler n'est pas jouer

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

Remarque : cette ECE correspond au sujet zéro « La flûte à bec : souffler n'est pas jouer » présenté par l'inspection générale en 2012 et publié sur le site :
http://eduscol.education.fr/cid58020/des-sujets-de-physique-chimie-au-baccalaureat.html

CHAPITRE 4

OBSERVER

Diffraction des ondes et interférences

> Manuel pages 74 à 99

Choix pédagogiques

Les activités de ce chapitre permettent d'étudier la diffraction et les interférences, deux phénomènes ondulatoires. Dans le cas de la diffraction, l'influence de la taille de l'ouverture ou de l'obstacle sera abordée pour les ondes ultrasonores et pour une lumière monochromatique. La troisième activité permet d'observer l'influence de la longueur d'onde sur le phénomène de diffraction et l'écart angulaire de diffraction.
Une activité est proposée pour aborder les interférences en lumière monochromatique.
Les activités ont été élaborées avec du matériel qu'on trouve souvent dans les établissements scolaires.
Des animations, des vidéos et des simulations ont été créées pour illustrer ce chapitre et aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Bulle de savon.

Quel phénomène caractéristique de la nature ondulatoire de la lumière intervient lors de l'observation de couleurs vives sur une bulle de savon ?

On peut observer sur les bulles de savon des couleurs dues aux phénomènes d'interférences. Ce phénomène est une propriété des ondes au même titre que la diffraction étudiée elle aussi dans ce chapitre. La diffraction et les interférences seront étudiés en lumière monochromatique et en lumière blanche (comme sur la photographie).

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Une propriété des ondes

Commentaires

Cette activité permet de découvrir le phénomène de diffraction avec des ondes ultrasonores.
Cette activité documentaire peut se transformer en activité expérimentale.

Réponses

S'APPROPRIER

1. La valeur de l'amplitude de la tension mesurée U est la plus élevée pour $\alpha = 0°$.
Série 1, $U_{max} = 400$ mV ; série 2, $U_{max} = 350$ mV et série 3, $U_{max} = 200$ mV.
Les courbes 1 et 2 sont quasiment semblables, l'amplitude de la tension est maximale pour $\alpha = 0°$ et ensuite elle diminue nettement de manière symétrique.
Pour la courbe 3, l'amplitude de la tension est maximale pour $\alpha = 0°$ et ensuite elle diminue de manière symétrique mais moins rapidement que les deux autres. À partir de $\alpha = \pm 30°$, l'amplitude de la tension de la courbe 3 est plus importante que celles des courbes 1 et 2.

ANALYSER

2. a. Lorsqu'il y a une ouverture de largeur a sur le trajet de l'onde ultrasonore, l'amplitude U_{max} est plus faible que lorsqu'il n'y a pas d'obstacle. Plus la largeur de la fente est faible, plus la tension U_{max} est faible.
b. Si la largeur de la fente est de 20 mm, la propagation de l'onde n'est pas modifiée (courbes 1 et 2 quasiment identiques). Par contre, si la largeur de la fente est de 4 mm alors la propagation de l'onde est modifiée.

VALIDER

3. a. La porte ouverte joue le rôle d'ouverture. Au passage de cette ouverture les ondes sonores sont diffractées, la direction de propagation de l'onde est modifiée, on peut donc entendre une discussion même si on ne situe pas devant la porte ouverte.
b. La diffraction se manifeste par un étalement des directions de propagation de l'onde lorsque celle-ci rencontre une ouverture (ou un obstacle).

2. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Diffraction d'une lumière monochromatique

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

3. SIMULATION
Diffraction de la lumière blanche

Commentaires

Cette activité permet d'étudier à l'aide d'une simulation la figure de diffraction de la lumière blanche par une fente.
Avec la simulation, on peut modifier les valeurs de différents paramètres.

Réponses

CONNAÎTRE

1. $\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$ donc $L = \frac{2\lambda D}{a}$.

La longueur d'onde λ , la distance objet fente-écran D et la largeur de la fente a peuvent influer la largeur de la tache de diffraction L.

Si λ augmente, L augmente. Si D augmente, L augmente. Si a augmente, L diminue.

RÉALISER

2. Utiliser la simulation.

ANALYSER

3. $\lambda_{violet} = 400$ nm ; $\lambda_{rouge} = 750$ nm.

Si la longueur d'onde augmente, L augmente $L_{violet} < L_{rouge}$.

Si la longueur d'onde augmente, l'écart angulaire de diffraction θ augmente $\theta_{violet} < \lambda_{rouge}$.

Le centre de la figure de diffraction sera blanc (superposition de toutes les lumières colorées visibles) et on observera des irisations sur les bords.

RÉALISER

4. Utiliser la simulation.

COMMUNIQUER

5. La lumière du jour joue le rôle de lumière blanche, on observera un centre de la figure de diffraction blanc (superposition de toutes les lumières colorées visibles) et des irisations sur les bords.

4. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Interférences avec des ondes lumineuses

Commentaires

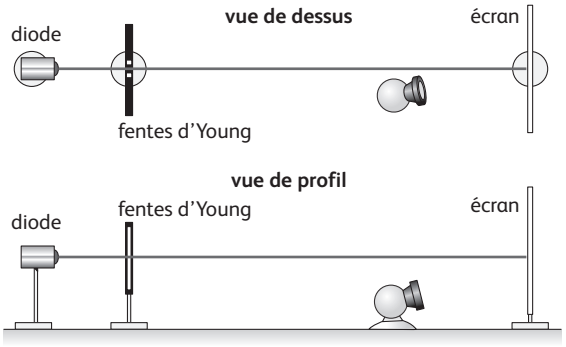
Pour étudier quantitativement le phénomène d'interférences lumineuses (compétence exigible), il faut disposer de diodes laser de couleurs différentes. Tous les lycées sont équipés de diodes laser rouges (650 nm). Il faut donc se procurer des diodes laser vertes et si possible quelques bleues (plus chères). On trouve sur Internet de nombreux sites vendant des diodes laser à très bon prix (prix inférieur à 13 euros par exemple pour une diode laser verte), mais attention, pour utiliser ces diodes en classe en toute légalité, elles doivent avoir une puissance inférieure à 2 mW.

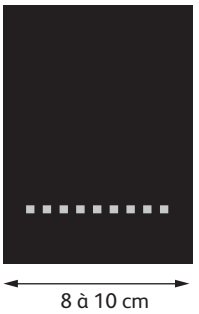
Voici par exemple l'adresse d'un site où l'on peut se procurer des diodes laser à bon prix : http://www.acheterlaser.com/acheter–stylo–laser–vert–1mw.html

D'autre part, pour vérifier expérimentalement l'expression de l'interfrange, il faut faire des mesures précises, ce qui n'est pas facile car l'interfrange est de l'ordre de quelques millimètres.

Une solution possible pour améliorer la précision de la mesure consiste à photographier la figure d'interférence à l'aide d'une webcam de bonne qualité (webcam haute définition avec mise au point automatique) ou d'un appareil photo numérique.

Pour cela, placer la webcam dans l'axe du montage mais légèrement au-dessus ou en dessous pour ne pas couper le faisceau laser comme le montre le schéma ci-dessous.





Pour qu'il n'y ait pas saturation de l'image au niveau des franges brillantes de la tache centrale, il faut utiliser un écran noir (type papier Canson®). Il n'est pas utile de faire l'obscurité dans la salle.

Découper une bande de papier de 8 à 10 cm de largeur et centrer la figure d'interférence sur cette bande. Prendre une photo en réglant la position (ou le zoom) de la webcam de telle sorte que le champ soit un peu plus large que la bande (il doit y avoir un peu de blanc de chaque côté de l'écran noir pour qu'on puisse étalonner en largeur la figure d'interférence). Ce blanc permet également de faire la mise au point. Il peut être coupé ensuite à l'aide d'un logiciel de retouche d'image mais ce n'est pas indispensable. On peut également tracer deux traits verticaux sur le Canson® noir qui serviront de repère. Cette méthode permet d'obtenir une plus grande amplitude pour les franges brillantes lorsque l'on utilise *Salsa*J.

Réponses

RÉALISER

1. Les mesures ont été réalisées avec des fentes de Jeulin et $D = 2$ m.

Distance entre les fentes	0,20 mm	0,30 mm	0,50 mm
Diode laser $\lambda = 650$ nm	6, 5 mm	4,3 mm	2,6 mm
Diode laser $\lambda = 532$ nm	5,3 mm	3,5 mm	2,1 mm

ANALYSER

2. Plus la distance D est grande, plus l'interfrange est grand, ce qui permet d'avoir une meilleure précision sur la mesure.

VALIDER

3. a. L'interfrange est inversement proportionnel à la distance entre les fentes et proportionnel à la longueur d'onde. Les mesures effectuées sont en accord avec l'expression de i. Seul la distance D n'a pas été testées.

b. La lumière blanche est une infinité de radiations monochromatiques de couleurs différentes. Chaque radiation forme une figure d'interférence. L'interfrange n'étant pas le même pour chaque radiation, car il dépend de λ, la figure d'interférence ne présente qu'une frange blanche et quelques franges irisées de part et d'autre.

EXERCICES Appliquer le cours

La diffraction (§1 du cours)

14. Connaître un phénomène

a. Le phénomène de diffraction permet à l'ouvreuse d'entendre le son.

b. La dimension de l'ouverture est de 0,80 m $< \lambda_g$, la diffraction est donc plus importante pour le son grave.

15. Exploiter l'écart angulaire de diffraction

a. L'écart angulaire de diffraction, $\theta = \frac{\lambda}{a}$, diminue si la largeur de la fente a augmente et augmente si la longueur d'onde λ de la lumière diffractée augmente.

b. $\lambda_{rouge} > \lambda_{violet}$ donc $\theta_{rouge} > \theta_{violet}$.

16. Décrire une figure de diffraction

a. Si la fente est verticale, la figure de diffraction est horizontale et composée d'une tache centrale très lumineuse, encadrée par des taches secondaires moins intenses.

b. Si la fente est horizontale, la figure de diffraction est verticale et composée d'une tache centrale très lumineuse, encadrée par des taches secondaires moins intenses.

c. Si l'élève tourne la fente dans le sens des aiguilles d'une montre, la figure de diffraction tourne dans le plan de l'écran dans le sens des aiguilles d'une montre.

17. Identifier le phénomène de diffraction

La fente fine joue le rôle d'obstacle de faible dimension, cette expérience permet d'observer le phénomène de diffraction.

Les interférences (§2 du cours)

18. Connaître les conditions d'interférences

a. $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{5{,}00 \times 10^4} = 2{,}00 \times 10^{-5}$ s = 20,0 µs.

b. Les deux émetteurs, banchés sur le même GBF constituent des sources d'ondes cohérentes qui émettent en phase. Dans ces conditions on peut observer des interférences dans la partie commune aux deux faisceaux.

c. Pour avoir des interférences constructives, la différences des retards $\Delta\tau = kT$ avec $k \in \mathbb{Z}$.

Et pour avoir des interférences destructives :

$\Delta\tau = (2k + 1)\frac{T}{2}$

d.

Points	*M*	*N*	*P*
Durée par rapport à E_1 en µs	688	700	716
Durée par rapport à E_2 en µs	668	710	756
$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ en µs	–20	10	40

Les interférences sont constructives en M (k=–1) et P (k = 2) et destructives en N (k = 0).

19. Connaître l'influence de la longueur d'onde

En mesurant dans chaque cas la largeur de 7 interfranges (pour une meilleure précision), on trouve :

$7i_R = 32{,}5$ mm ; $7i_V = 27$ mm.

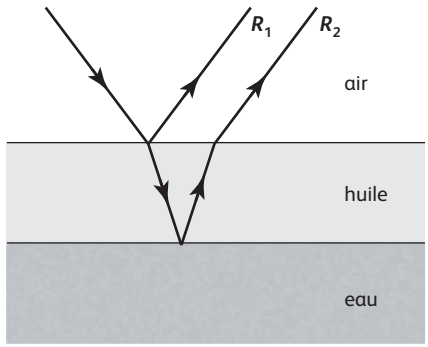
S'il y a proportionnalité entre i et λ, on doit vérifier :

$\frac{i_R}{i_V} = \frac{\lambda_R}{\lambda_V}$; $\frac{7i_R}{7i_V} = 1{,}2$; $\frac{\lambda_R}{\lambda_V} = \frac{650}{532} = 1{,}18$

Aux erreurs de mesure près, l'interfrange est proportionnel à la longueur d'onde.

20. Expliquer les couleurs interférentielles

L'huile ou l'essence qui recouvre la route mouillée forme une fine couche transparente. La lumière se réfléchit à la surface de séparation air-huile et à la surface de séparation huile-eau. Les rayons réfléchis interfèrent et on observe les couleurs interférentielles.



EXERCICES S'entraîner

21. Exercice résolu dans le manuel

22. Application de l'exercice résolu

1. Placer sur le chemin de la diode laser de longueur d'onde λ = 650 nm , le fil de diamètre a. Placer un écran à une distance D du fil diffractant pour observer la figure de diffraction et y mesurer une largeur de tache centrale de diffraction L = 3 cm.

2. Il manque la valeur de D et la valeur du diamètre du fil a.

3. Dans les conditions usuelles d'observations D = 2 m

D'après l'expression de l'écart angulaire de diffraction et en étant dans de bonnes conditions d'observations

$\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$ donc $a = \frac{2D\lambda}{L}$; $a = 9 \times 10^{-5}$ m = 9 × 10 µm.

Donc les fils de diamètre 76 µm (L = 3,4 cm) et 100 µm (L = 2,6 cm) conviendraient.

23. Exercice résolu dans le manuel

24. Application de l'exercice résolu

1. $400 < \lambda_0 < 750$ nm.

2. $e = \dfrac{\lambda_0}{4n}$ pour $\lambda_0 = 400$ nm.

$e = 8{,}3 \times 10^{-8}$ m $= 0{,}083$ µm pour $\lambda_0 = 750$ nm.

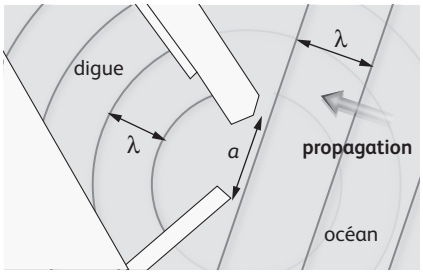
$e = 1{,}6 \times 10^{-7}$ m $= 0{,}16$ µm.

25. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

Soit λ la longueur d'onde de l'onde en m, v la célérité de l'onde en m·s^{-1} et T la période temporelle de l'onde en s. $\lambda = v \times T$ avec la célérité $v = 58$ km·h^{-1} $= 16$ m·s^{-1} et la période temporelle $T = 5{,}0$ s. Ainsi, $\lambda = 81$ m.

$a < \lambda$, on peut donc observer le phénomène de diffraction.



26. Les ondes radio

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, réaliser, valider.**

a. Une onde est diffractée si elle rencontre un obstacle (ou une ouverture) dont la dimension est du même ordre de grandeur ou inférieure à la longueur d'onde de l'onde. Si l'obstacle est beaucoup plus grand, elle sera arrêtée.
Une émission centimétrique, dont la longueur d'onde est de l'ordre du cm sera arrêtée par une petite colline de quelques mètres.

b. $\lambda = \dfrac{c}{f} = \dfrac{3{,}00 \times 10^8}{162 \times 10^3} = 1{,}85 \times 10^3$ m $= 1{,}85$ km, l'ordre de grandeur de la longueur d'onde est 1 km.

c. La largeur de l'entrée de la vallée (ouverture) et la longueur d'onde sont du même ordre de grandeur, il y aura diffraction de l'onde radio et donc étalement des directions de propagation de l'onde. Les habitants pourront donc être prévenus.

27. In English Please

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. D'après les expériences 2 et 3, si a diminue alors L augmente, donc a se trouve au dénominateur de l'expression : la première expression est fausse.
D'après les expériences 2 et 4, si D diminue alors L diminue, donc D se trouve au numérateur de l'expression : la deuxième expression est fausse.

b. $\dim \dfrac{2\lambda D}{a} = \dfrac{\dim\lambda \times \dim D}{\dim a} = \dfrac{L^2}{L} = L.$

La troisième expression est bien homogène à une longueur.

c. $L_1 = \dfrac{2\lambda_1 D}{a}$ et $L_2 = \dfrac{2\lambda_2 D}{a}$;

$\dfrac{L_1}{L_2} = \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}$.

d. $\lambda_1 = \dfrac{L_1}{L_2} \times \lambda_2$;

$\lambda_1 = \dfrac{3{,}4 \times 10^{-2}}{2{,}1 \times 10^{-2}} \times 405 \times 10^{-9} = 6{,}6 \times 10^{-7}$ m.

e. Calcul d'écart relatif :

$$\left|\frac{\text{valeur obtenue} - \text{valeur attendue}}{\text{valeur attendue}}\right| = \frac{6{,}6 \times 10^2 - 658}{658} = 3{,}0 \times 10^{-3} = 0{,}30\ \%.$$

La valeur est compatible.

28. ★ Échographie

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser.**

a. $\lambda = \dfrac{v}{f}$; $1\,450 < v < 1\,700$ m·s^{-1} ;

$1{,}5 \times 10^{-3} < \lambda < 1{,}7 \times 10^{-3}$ m.

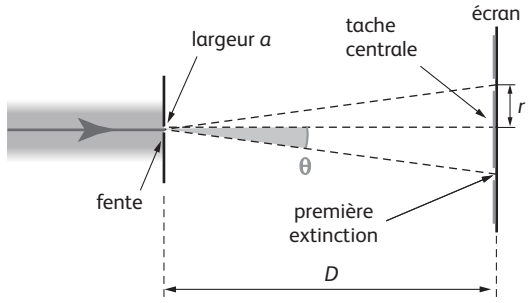
b. Si la dimension de l'obstacle devient inférieure à la longueur d'onde alors le phénomène de diffraction devient trop important.
Si on souhaite diminuer la longueur d'onde pour détecter des détails plus petits, il faut augmenter la fréquence.

c. Les fréquences utilisées sont de 2,0 MHz pour les organes profonds, de 6,0 MHz pour les petits organes et la pédiatrie, et de 15 MHz pour l'ophtalmologie.

29. ★ Une ouverture circulaire

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a.



b. $\tan\theta \approx \theta = \dfrac{r}{D}$; $\dfrac{r}{D} = 1{,}22\dfrac{\lambda}{a}$ donc $r = 1{,}22\dfrac{\lambda D}{a}$.

c. Si la longueur d'onde λ augmente alors le rayon r augmente.

$\dfrac{r_2}{r_1} = \dfrac{\lambda_2}{\lambda_1}$; $r_2 = \dfrac{\lambda_2}{\lambda_1} r_1$; $r_2 = 8{,}6$ mm.

30. ★ Sources synchrones et cohérentes

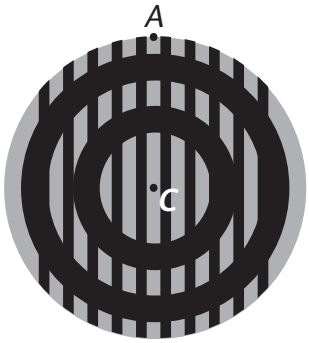
> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, communiquer.**

Pour obtenir une figure d'interférence stable à la surface de l'eau, il faut que les deux sources soient cohérentes c'est-à-dire qu'elles gardent un déphasage constant dans le temps. Dans le cas de la figure ⓑ, ce déphasage

est nul et il le reste obligatoirement puisque les deux pointes sont sur le même vibreur.
Dans le cas de la figure ⓐ, les vibreurs sont indépendants. Ils vibrent à la même fréquence, mais cette fréquence peut fluctuer un peu par rapport à la valeur affichée. Les deux GBF fluctuant de façon aléatoire, le déphasage varie lui aussi de façon aléatoire et la figure d'interférence n'est pas stable.
Remarque : dans le cas de la figure ⓑ, le GBF fluctue aussi mais cela n'a pas de conséquence sur le déphasage.

31. ★ **Trous d'Young**

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**



a. Les deux trous sont éclairés par la même source de lumière monochromatique. Ils se comportent comme deux sources cohérentes. On peut donc observer une figure d'interférence dans la partie commune des deux faisceaux.
b. Le centre de la figure d'interférence est sur l'axe de symétrie des deux sources. Les distances entre les sources et le point *C* sont égales. Elles n'introduisent pas de déphasage supplémentaire. La différence de marche est nulle. Comme les sources émettent en phase, le point *C* est sur une frange brillante.
c. Le point *A* est dans le plan de symétrie des sources car les sources sont dans un plan horizontal et *A* dans le plan vertical contenant *C*. Les distances entre les sources et *A* sont donc égales et le point *A* est sur une frange brillante, la même que *C* puisqu'elle correspond à $\Delta = 0$.
d. On peut en déduire que les franges d'interférences sont des droites verticales sur l'étendue de la figure de diffraction.
Remarque : il s'agit en réalité d'arcs d'hyperbole, lieu des points dont la différence des distances à deux points fixes est constante, mais on peut localement les assimiler à des segments de droite.

32. ★ **S'auto-évaluer**

a. Il y a interférences constructives si $d_2 - d_1 = k\lambda$, avec k entier.
Calculons le rapport $\frac{\delta}{\lambda}$ en exprimant d en nm :

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{2{,}60 \times 10^3}{650} = 4$$

On trouve $k = 4$: le point *A* se trouve au centre d'une frange brillante.
b. Utilisons la même méthode qu'à la question précédente :

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{3{,}90 \times 10^3}{650} = 6$$

Le point *B* se trouve donc également au milieu d'une frange brillante.
Dessinons les franges pour déterminer le nombre de franges entre *A* et *B*.
Il n'y a qu'une frange brillante qui correspond à la valeur $k = 5$.
c. Les différences de marche entre S_1 ou S_2 et *A* ne sont pas modifiées puisque les points *A* et *B* sont toujours à la même place. La différence de marche n'introduit pas de déphasage supplémentaire mais comme les sources vibrent maintenant en opposition de phase, les ondes arrivent en opposition de phase en *A* et *B*. Ces deux points sont donc maintenant au milieu de franges sombres.



33. ★★ **Interférences et diffraction**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Calculons le rapport $\frac{L}{i} : \frac{L}{i} = \frac{\frac{2\lambda D}{a}}{\frac{\lambda D}{a_{1-2}}} = \frac{2\lambda D}{a} \times \frac{a_{1-2}}{\lambda D} = \frac{2a_{1-2}}{a}$.

On en déduit : $\frac{a_{1-2}}{a} = \frac{L}{2i}$.

b. Le rapport $\frac{L}{i}$ représente le nombre d'interfranges dans la tache centrale. Puisqu'il y a 11 interfranges, on en déduit : $\frac{a_{1-2}}{a} = \frac{11}{2} = 5{,}5$.
La distance entre les fentes est 5,5 fois plus grande que la largeur des fentes.
c. Le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué que la largeur des fentes est petite. Si on augmente la largeur a des fentes, on diminue le phénomène de diffraction sans changer l'interfrange i, qui ne dépend que de la distance a_{1-2} entre les fentes. Il y aura donc moins de franges brillantes dans la tache centrale.
d. On retrouve ce résultat à partir de l'expression établie en **b.** Si on augmente a, le rapport $\frac{a_{1-2}}{a}$ diminue. Il en est de même du rapport $\frac{L}{i}$ qui donne le nombre de franges dans la tache centrale.

34. ★★ **Couleurs d'une bulle de savon**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

a. Le rayon R_1 subit juste une réflexion. Il a donc une intensité :

$$I_{R_1} = 0{,}02\, I.$$

Le rayon T_1 subit deux transmissions. Il a donc une intensité :

$$I_{T_1} = 0{,}98 \times 0{,}98\, I = 0{,}96\, I.$$

Le rayon R_2 subit deux transmissions et une réflexion. Il a donc une intensité :

$$I_{R_2} = 0{,}98 \times 0{,}02 \times 0{,}98\, I = 0{,}019\, I.$$

Le rayon T_2 subit deux transmissions et deux réflexions. Il a donc une intensité :

$$I_{T_2} = 0{,}98 \times 0{,}02 \times 0{,}02 \times 0{,}98\, I = 3{,}8 \times 10^{-4}\, I.$$

b. C'est entre les rayons transmis que la différence d'intensité est la plus grande. Les rayons réfléchis ont pratiquement la même intensité.

c. Les interférences destructives sont plus marquées lors de la réflexion : l'intensité est pratiquement nulle. On voit donc mieux les couleurs par réflexion. Par transmission, il n'y a pratiquement pas de différence entre les maxima et les minima d'intensité. Les interférences sont très peu contrastées.

35. Microscope à ultrasons

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Un microscope acoustique (le premier date de 1974) utilise des ondes ultrasonores, ondes mécaniques longitudinales de fréquences supérieures à 20 kHz.

Il permet d'étudier la structure interne d'échantillons (même ceux en matériaux opaques) sans les endommager. On peut obtenir des images acoustiques d'échantillons de quelques cm² de surface sur quelques dizaines de µm d'épaisseur.

Ces images fournissent des informations sur les propriétés mécaniques et sur la structure des matériaux. Cette technique est utilisée dans la recherche et l'industrie pour détecter des défauts dans les matériaux mais aussi dans le domaine médical pour explorer des échantillons d'os et de cartilage ainsi que dans le domaine agroalimentaire pour le contrôle de certains produits.

Le fonctionnement d'un microscope à ultrasons est le suivant : un générateur d'ultrasons convertit un signal électrique en un signal acoustique. Le faisceau focalisé en une petite tache est recueilli par réflexion (ou transmission) après interaction entre l'onde incidente et les inhomogénéités du matériau. L'onde est ensuite reconvertie en un signal électrique.

La résolution spatiale de l'instrument, c'est-à-dire la dimension des plus petits détails repérables, est de l'ordre de 0,1 µm pour une onde ultrasonore de fréquence 1 GHz.

La résolution est limitée par le phénomène de diffraction qui intervient lorsque la taille des inhomogénéités est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de l'onde ultrasonore. L'image obtenue est alors de trop mauvaise qualité pour repérer des défauts de taille inférieure à 0,1 µm.

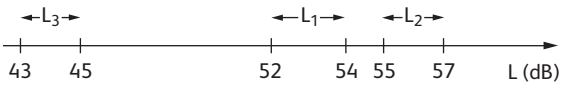
EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

36. CASQUE AUDIO À RÉDUCTION DE BRUIT

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, valider.**

1. Les intervalles de confiance permettent de conclure que les valeurs mesurées sont significativement différentes car ces intervalles ne se chevauchent pas :



2. Les niveaux sonores sont ici systématiquement ajustés à la même valeur :

$$L_A = L_B = 10 \log \frac{I}{I_0} = 50 \text{ dB}.$$

Si on additionne les intensités de chaque source, on obtient :

$$L_{A+B} = 10 \log \frac{I + I}{I_0} = 10 \log \left(2 \times \frac{I}{I_0}\right)$$

$$= 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log 2 = L_A + 3$$

(augmentation de 3 dB).

Ainsi le niveau sonore correspondant est 50 + 3 = 53 dB ; il s'agit de l'expérience 1.

3. Dans les expériences 2 et 3, les deux signaux sont émis avec la même fréquence, le phénomène d'interférences entre les deux signaux intervient :

– si les signaux sont reçus en phase, il y a interférences constructives et le niveau sonore augmente (56 dB au lieu de 53 dB) ;

– si les signaux sont reçus en opposition de phase, il y a interférences destructives et le niveau sonore diminue (44 dB au lieu de 53 dB).

4. Ainsi, c'est l'expérience 3 qui correspond au dispositif actif de réduction de bruit car le niveau sonore global diminue lorsque le dispositif émet un signal anti-bruit en opposition de phase avec le bruit provenant de l'extérieur.

37. CD ET AUTRES SUPPORTS DE L'INFORMATION

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser.**

1. L'onde qui se réfléchit au fond d'un creux parcourt une distance supplémentaire $d = 2h_c$ par rapport à l'onde qui se réfléchit sur un plat.

$d = 2{,}5 \times 10^{-7}$ m.

2. $\Delta\tau = \dfrac{d}{v} = \dfrac{2{,}5 \times 10^{-7}}{1{,}93 \times 10^{8}} = 1{,}3 \times 10^{-15}$ s.

$T = \dfrac{\lambda_0}{c} = \dfrac{780 \times 10^{-9}}{3{,}0 \times 10^{8}} = 2{,}6 \times 10^{-15}$ s. $\Delta t = \dfrac{T}{2}$.

3. $\dfrac{\Delta\tau}{T} = 0{,}5$, or pour avoir des interférences destructives $\Delta\tau = (2k + 1)\dfrac{T}{2}$ et si $k = 0$, $\Delta\tau = \dfrac{T}{2}$ donc les interférences sont destructives et le signal reçu par le capteur est minimal.

4. Le phénomène « parasite » est la diffraction.

38. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

La couleur de certains animaux

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, communiquer.**

Couleur pigmentaire	Couleur structurale
D'après le document 1, la couleur de certains animaux est due aux pigments comme les mélanines ou ptérines synthétisés par les animaux ou les caroténoïdes d'origine alimentaire.	D'après le document 2, la couleur de certains animaux est due à des particularités de structure qui peuvent engendrer des interférences.
La couleur observée fait intervenir la lumière, l'objet coloré et l'œil de l'observateur. Elle est liée à la modification de la lumière blanche, qui contient toutes les couleurs, lors de son interaction avec l'objet. La lumière transmise est privée d'une de ses composantes et apparaît sensiblement de la couleur complémentaire de celle qui a été absorbée.	Des interférences se produisent lorsque l'on a une relation particulière entre la longueur d'onde de la lumière et la périodicité du matériau.
La couleur pigmentaire ne dépend pas de l'angle d'observation.	La couleur structurale dépend de l'angle d'observation.

39. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Nappe de kérosène

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, valider.**

À partir de l'expression de la différence de marche donnée dans le document 1 et en utilisant la condition d'interférences constructives on détermine l'expression de la longueur d'onde :

$$\left(k-\frac{1}{2}\right)\lambda_0 = 2ne \; \lambda_0 = \frac{2ne}{\left(k-\frac{1}{2}\right)} = \frac{4ne}{2k-1}$$

Calcul de différentes longueurs d'onde selon la valeur de k :

$k = 1$	$k = 2$
$\lambda_0 = 2{,}5 \times 10^{-6}$ m	$\lambda_0 = 0{,}85 \times 10^{-7}$ m

$k = 3$	$k = 4$
$\lambda_0 = 5{,}1 \times 10^{-7}$ m	$\lambda_0 = 3{,}6 \times 10^{-7}$ m

Puis en utilisant le document 2, on conclut sur la couleur associée à chaque longueur d'onde calculée.

$k = 1$	$k = 2$
$\lambda_0 = 2{,}5 \times 10^{-6}$ m	$\lambda_0 = 0{,}85 \times 10^{-7}$ m
$\lambda_0 > 750$ nm (non visible)	$\lambda_0 > 750$ nm (non visible)

$k = 3$	$k = 4$
$\lambda_0 = 5{,}1 \times 10^{-7}$ m	$\lambda_0 = 3{,}6 \times 10^{-7}$ m
(VERT)	$\lambda_0 = <$ 400 nm (non visible)

La nappe de kérosène apparait verte à un observateur située à la verticale de la nappe.

CHAPITRE

5

OBSERVER

Spectres UV-visible et IR

> Manuel pages 100 à 123

Choix pédagogiques

Le cours de ce premier chapitre de chimie (organique) présente tout d'abord les formules topologiques, dont l'emploi généralisé en chimie organique permet de réduire considérablement le temps nécessaire à la représentation des molécules.

Ensuite, les nouvelles classes fonctionnelles, spécifiques au programme de TermS sont présentées juste avant d'aborder leur nomenclature associée, présentées par analogie avec les règles déjà vues en 1reS. Les règles de nomenclatures vues en 1reS sont rappelées dans la fiche méthode 1 page 580 et nous avons traité ici le cas des espèces monofonctionnelles relativement simples (les espèces polyfonctionnelles sont traitées au chapitre 23 ainsi que dans la fiche méthode 1).

La suite du cours est consacrée aux spectroscopies d'absorption UV-visible et IR (la spectroscopie de RMN étant présentée au chapitre 6). Les principes généraux de ces différentes spectroscopies sont donnés avant de s'intéresser à la spectroscopie UV-visible, déjà abordée par les élèves en 1re S.

Nous insistons essentiellement sur l'aspect qualitatif de la spectroscopie UV-visible, qui permet de caractériser une espèce solubilisée dans un solvant donné. Nous rappelons le lien entre la longueur au maximum d'absorption λ_m et la couleur de la solution analysée (l'exercice 28 a pour but de revenir sur le caractère simpliste de ce lien). La loi de Beer-Lambert ne sert dans ce chapitre qu'à déterminer le coefficient d'absorption molaire $\varepsilon_{max}(\lambda_m)$ au maximum d'absorption afin de caractériser l'intensité de la coloration de l'espèce.

Enfin, la partie finale du cours traite de la spectroscopie IR, et à nouveau uniquement de son aspect qualitatif, permettant de mettre en évidence la présence de certains types de liaison dans une molécule organique. L'activité 3 est fortement recommandée afin de se familiariser avec la présentation et l'exploitation de ces spectres. Nous avons délibérément choisi de ne pas parler des harmoniques, qui interviennent pourtant fréquemment dans les spectres expérimentaux (notamment l'harmonique de la bande intense relative à la liaison C=O située aux environs de 1 750 cm^{-1}, qui apparaît donc aux environs de 3 500 cm^{-1}).

Pour finir, nous mettons l'accent sur l'impact des liaisons hydrogène sur les spectres, comme le recommande le programme.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

Le logiciel de simulation présent dans le manuel numérique propose une banque de données de spectres IR comprenant les exemples du manuel. Ce logiciel est également téléchargeable à l'adresse suivante : http://www.chimsoft.com/TelechargerChimPack.php

OUVERTURE DE CHAPITRE

En l'absence de vent, les grandes agglomérations sont souvent confrontées au *smog*, brume jaunâtre issue de l'accumulation de différents polluants atmosphériques.

Comment identifier et quantifier la présence des différents polluants atmosphériques ?

Le débat peut s'orienter dans différentes directions : quels sont les différents polluants atmosphériques ? Comment les identifier ? Comment mesurer leur teneur dans l'atmosphère ? On pourra même s'interroger sur l'origine linguistique du mot *smog*.

Le mot *smog*, est d'origine anglaise : il est issu de la contraction des mots *smoke* (fumée) et *fog* (brouillard). Sa couleur jaunâtre est un indice qui doit permettre aux élèves de suggérer l'utilisation d'un spectrophotomètre UV-visible pour mesurer l'absorbance d'un échantillon d'atmosphère polluée. Cette couleur jaune-brun du *smog* est principalement due à la présence de dioxyde d'azote NO_2 dans l'air. (Toutefois, la teneur des NOx est essentiellement mesurée par chimie-luminescence ou encore par spectroscopie infrarouge.)

La spectrophotométrie UV-visible est quant à elle privilégiée pour mesurer la teneur en ozone O_3, gaz pourtant incolore à faibles concentrations : l'absorption se fait en effet dans le domaine de l'ultraviolet, ce que les élèves doivent pouvoir déduire du rôle protecteur de la couche d'ozone stratosphérique vis-à-vis du rayonnement UV d'origine solaire.

Enfin, les particules fines (ou aérosols), classées par tailles (les PM10 de diamètre inférieur à 10 µm, les PM 2,5 de diamètre inférieur à 2,5 µm, etc.), sont caractérisées par radiométrie.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Représenter et nommer des molécules

Commentaires
Nous essayons ici de mélanger révisions et acquisition de nouvelles connaissances sous une forme « ludique ». Il s'agit de relier chaque formule semi-développée à une formule topologique, un nom et une classe fonctionnelle donnés. Outre la présentation d'un exemple précis de formule topologique sur l'exemple d'un alcène (a priori une « nouvelle » classe fonctionnelle pour les élèves), nous avons choisi de faire deviner par déduction la classe fonctionnelle des amides.

Réponses
S'APPROPRIER

1. a. D'après le document 2, un alcène possède une double liaison C=C.

b. On constate que seul l'atome d'oxygène, ainsi que l'atome d'hydrogène auquel il est lié, figurent explicitement dans la formule topologique. Les atomes de carbone figurent implicitement aux extrémités d'une ligne brisée. Les atomes d'hydrogène liés aux atomes de carbone sont sous-entendus, et peuvent être retrouvés en appliquant la règle de l'octet aux atomes de carbone.

ANALYSER

2. a. En appliquant ce qui a été vu à la question 1, on obtient les correspondances :
I-4 ; II-5 ; III-3 ; IV-2 ; V-1.

b. En 1re S ont été vues les classes fonctionnelles des alcools (A5), des alcanes (B2), et des acides carboxyliques (D1). Par ailleurs, les deux groupes caractéristiques connus sont :



Toujours grâce aux connaissances de 1reS, on peut retrouver les noms associés aux trois molécules des classes fonctionnelles connues : II–5–d–A ; IV–2–a–B et V–1–b–D.

Les deux nouvelles classes fonctionnelles sont : celle des alcènes (E, formule 4 d'après le doc. 2) et celle des amides (C, formule 3 par élimination). On déduit les deux dernières associations, grâce notamment au squelette carboné : I–4–c–E (4 atomes de carbone dans la chaîne carbonée principale et un substituant méthyle) et III–3–e–C (chaîne carbonée linéaire à 6 atomes de carbone).

COMMUNIQUER

3. Dans la formule topologique d'une molécule organique, la chaîne carbonée est représentée par une ligne brisée, et seuls les atomes autres que ceux de carbone et d'hydrogène sont écrits, ainsi que les atomes d'hydrogène liés à ces autres atomes. Les doubles liaisons sont représentées par un double trait.

Les principaux avantages de la formule topologique sont :
– le gain de temps ;
– le gain de place ;
– la mise en valeur des groupes caractéristiques, qui ressortent mieux de la représentation.

2. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Contrôle qualité d'un médicament

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

3. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Étude de spectres infrarouges

Commentaires
Le but de cette activité est d'introduire progressivement la lecture de spectres IR, puis d'étudier quels sont les renseignements qu'ils peuvent nous apporter. Nous avons décidé de maintenir la présentation « classique » des spectres en chimie organique, notamment avec l'axe des ordonnées en transmittance (nous présentons, dans l'exercice 27, un spectre présenté en absorbance), et l'axe des abscisses « renversé ». Le spectre du document 3 est par ailleurs présenté avec le nom des axes en anglais, comme on les trouve fréquemment dans la « littérature ».

Réponses
S'APPROPRIER

1. a. L'abscisse des spectres IR est le nombre d'onde σ qui s'exprime usuellement en cm^{-1}. Leur ordonnée est la transmittance $T = \frac{I}{I_0}$ (avec I l'intensité du faisceau lumineux en sortie d'échantillon et I_0 son intensité en entrée), une grandeur sans dimension qui peut être présentée sans unité, comme dans le cas des spectres proposés. Puisque $0 \leqslant T \leqslant 1$, T peut aussi être exprimée en pourcentage.

b. Les bandes d'absorption se présentent vers le bas, puisque plus l'absorption est intense, plus la transmission du faisceau lumineux est faible et donc plus la valeur de transmittance est basse.

c. L'axe des abscisses est orienté vers la gauche : la valeur du nombre d'onde diminue lorsque l'on avance de la gauche vers la droite.

d. Sur chaque spectre, on observe toujours une bande d'absorption (de forme variable) juste en dessous (donc juste à droite) de 3 000 cm^{-1}.

RÉALISER

2. Calculons les longueurs d'onde relatives aux nombres d'onde extrêmes :

$$\lambda_{min} = \frac{1}{\sigma_{max}} = \frac{1}{4\,000 \times 10^2} = 2{,}5\ \mu m$$

$$\lambda_{min} = \frac{1}{\sigma_{max}} = \frac{1}{400 \times 10^2} = 25\ \mu m$$

Les radiations infrarouge correspondent à des longueurs d'onde supérieures à 0,8 µm. La plage de longueur d'onde utilisée ici correspond donc bien à des radiations IR.

ANALYSER

3. a. Dans le pentane (spectre A), il n'y a que des liaisons C–C et des liaisons C–H. Dans le méthoxyméthane, il n'y a que des liaisons C–O et des liaisons C–H. La seule liaison commune à ces deux espèces chimiques est donc la liaison C–H, que l'on retrouve par ailleurs dans les trois autres espèces chimiques, et qui se traduit donc par la présence dans un spectre IR d'une bande d'absorption aux alentours de 3 000 cm^{-1}.

b. En poursuivant le raisonnement précédent aux autres spectres du document 1, on peut identifier les positions de quelques bandes d'absorption caractéristiques de certaines liaisons :

Liaison	C–H	C=O	C=C	O–H (en phase gazeuse)
Nombre d'ondes (en cm^{-1})	~3 000	1 750	1 600	3 600
Spectre(s) correspondant(s)	A ; B ; C ; D ; E	D	C	E

c. Pour les deux isomères de position, on ne constate quasiment aucune différence entre les deux spectres sur la plage de nombres d'onde compris entre 1 500 cm^{-1} et 4 000 cm^{-1}, avec deux bandes qui ont une position commune : une première, assez intense, associée aux liaisons C–H un peu avant 3 000 cm^{-1} et la seconde, moins prononcée, associée à la liaison O–H aux environs de 3 600 cm^{-1}. Les liaisons au sein des deux isomères sont en effet analogues. On constate en revanche que les deux spectres diffèrent très nettement (par le nombre, la position et l'allure des différentes bandes) sur la plage de nombres d'onde compris entre 400 cm^{-1} et 1 500 cm^{-1} (beaucoup plus riche en bandes d'absorption). Il est ainsi possible de distinguer deux isomères par comparaison de leurs spectres IR « aux petits nombres d'onde », et ce, même s'ils ont une structure chimique très semblable. Cette partie du spectre IR d'une molécule est en effet totalement caractéristique de cette molécule : on parle d'« empreinte digitale » de la molécule.

d. Lorsque l'échantillon analysé est en phase gazeuse, la bande d'absorption caractéristique de la liaison O–H, située aux alentours de 3 600 cm^{-1} est relativement fine, et d'intensité relativement faible : elle n'atteint que le quart de la bande d'absorption relative aux liaisons C–H. En revanche, en phase condensée, alors que la bande d'absorption relative aux liaisons C–H ne semble pas modifiée, on remarque l'apparition d'une bande très large, d'intensité comparable à celle des liaisons C–H, et centrée aux environs de 3 300 cm^{-1} (on ne peut ici, a priori, pas dire si elle remplace ou si elle recouvre la petite bande observée en phase gazeuse).

Les élèves ont vu en 1re S que les liaisons hydrogène sont des interactions qui peuvent intervenir entre molécules possédant, entre autres, le groupe hydroxyle. Ces interactions ne sont pas (ou très peu) présentes en phase gazeuse, étant donné l'écart spatial moyen « très grand » entre molécules. En revanche, elles interviennent en phase condensée, et sont responsables de cette « déformation » de la bande d'absorption relative aux liaisons O–H.

Afin d'interpréter cet élargissement, on peut utiliser le modèle de la vibration mécanique par un ressort de constante de raideur *k* et de masse réduite *m*, modèle largement hors programme pour les élèves. Le nombre d'onde d'absorption dépend de la constante de raideur, et mécaniquement, celle-ci dépend de la «force» de la liaison entre les deux atomes impliqués dans la liaison. La force de la liaison O–H dépend de l'implication de l'atome d'hydrogène dans les liaisons hydrogène. Ces liaisons hydrogène n'étant pas les mêmes pour toute la population des liaisons absorbantes, on observe une dispersion assez large des nombres d'onde d'absorption. Attention à une erreur courante qui consiste à dire que la bande d'absorption est celle de la liaison hydrogène.

COMMUNIQUER

4. L'exploitation d'un spectre IR repose avant tout sur l'étude de la partie relative aux plus « grands » nombres d'onde, compris entre 1 500 cm^{-1} et 4 000 cm^{-1}, puisque dans cette zone, les bandes d'absorption sont caractéristiques de certains types de liaisons (et non pas de la molécule étudiée). Grâce à une table de données, on identifie alors la présence de certaines liaisons présentes au sein de la molécule (principalement, les liaisons O–H, C=O et C=C ; les liaisons C–H étant moins « originales » dans une molécule organique…). La connaissance de la formule brute de la molécule permet alors de progresser dans l'identification de la formule semi-développée de cette molécule, même s'il s'avérera sans doute difficile de distinguer certains isomères par cette méthode (il faudra alors s'intéresser à la partie du spectre aux plus faibles nombres d'onde ou bien s'appuyer sur la spectroscopie de RMN du proton, *cf.* chapitre 6).

EXERCICES Appliquer le cours

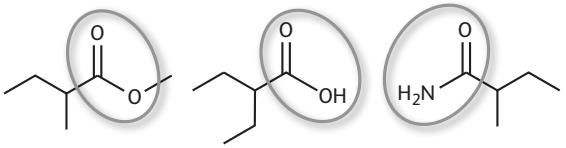
Les molécules organiques (§1 du cours)

10. Utiliser la representation topologique

a. C_5H_{10} **b.** $C_6H_{12}O_2$
c. $C_6H_{12}O_2$ **d.** $C_5H_{11}NO$

11. Identifier des classes fonctionnelles

a. et b.



c. ⓐ est un alcène, ⓑ un ester, ⓒ un acide carboxylique et ⓓ un amide

Nomenclature des molécules organiques (§2 du cours)

12. Nommer des molécules organiques

ⓐ est le 2-méthylbut-2-ène.

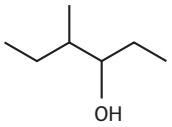
ⓑ est le 2-méthylbutanoate de méthyle.

ⓒ est l'acide 2-éthylbutanoïque.

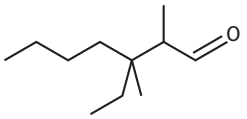
ⓓ est le 2-méthylbutanamide.

13. Écrire des formules topologiques

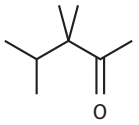
a. 4-méthylhexan-3-ol :



b. 3-éthyl-2,3-diméthylheptanal :



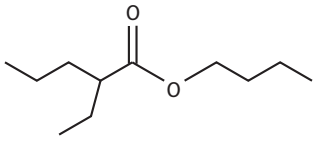
c. 3,3,4-triméthylpentan-2-one :



d. 2-méthylpropan-2-amine :



e. 2-éthylpentanoate de butyle :



Spectroscopies d'absorption (§3 du cours)

14. Exploiter un spectre UV-visible

a. On relève $\lambda_{m,1} = 310$ nm, $\lambda_{m,2} = 340$ nm et $\lambda_{m,3} = 530$ nm.

b. Seule $\lambda_{m,3}$ correspond à une radiation dans le visible. Les radiations de couleur verte sont donc principalement absorbées (mais aussi un peu le bleu à cause de l'épaulement à 500 nm). On en déduit que l'éosine est rouge/rosée en solution aqueuse.

c. On relève $A_{max} = 1{,}1$ et donc :

$$\varepsilon_{max} = \frac{A_{max}}{\ell c} = \frac{1{,}1}{1{,}0 \times 1{,}0 \times 10^{5}} = 1{,}1 \times 10^{5}\ \text{L·mol}^{-1}\text{·cm}^{-1}$$

$$> 10^{3}\ \text{L·mol}^{-1}\text{·cm}^{-1}$$

L'éosine est donc une espèce fortement absorbante.

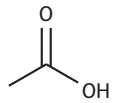
15. Exploiter un spectre infrarouge

a. La large bande de très forte absorption aux alentours de 3 350 cm^{-1} correspond à la liaison O–H du groupe hydroxyle. On observe par ailleurs la bande fine de moyenne absorption associée à la même liaison aux alentours de 3 600 cm^{-1}.

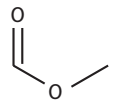
b. On n'observe plus que la bande fine de moyenne absorption au voisinage de 3 600 cm^{-1}, la large bande de très forte absorption a « disparu ». Ceci est dû à la présence de liaisons hydrogène présentes en solution, mais pas en phase gazeuse.

16. Utiliser une table de données IR

a. Les deux molécules envisageables sont :



acide éthanoïque



méthanoate de méthyle

b. La bande fine et de forte absorption aux alentours de 1 710 cm^{-1}, caractéristique de la liaison C=O, permet déjà d'envisager qu'il s'agit d'un acide carboxylique et non pas d'un ester (pour lequel la liaison C=O absorbe des radiations de nombres d'onde compris entre 1 735 cm^{-1} et 1 750 cm^{-1}).

La bande très large et intense présente au voisinage de 3 050 cm^{-1} correspond à la liaison O–H du groupe carboxyle et permet donc de confirmer sans aucune ambiguïté qu'il s'agit de l'acide éthanoïque.

EXERCICES S'entraîner

17. Exercice résolu dans le manuel

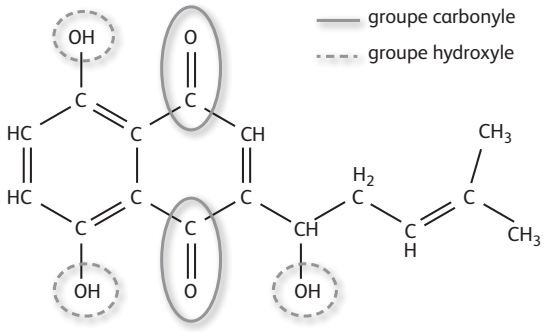
18. Application de l'exercice résolu

1. On vérifie que les molécules sont isomères en déterminant leur formule brute à partir de leur formule semi-développée, elle-même obtenue à partir du nom des deux molécules.

– acide butanoïque :
$CH_3-CH_2-CH_2-COOH$, de formule brute : $C_4H_8O_2$
– propanoate de méthyle :
$CH_3-CH_2-C(=O)O-CH_3$, de formule brute : $C_4H_8O_2$.
On constate bien qu'il s'agit de deux isomères, de même formule brute, mais de formule semi-développée (ou topologique) différente.
2. L'acide butanoïque fait partie de la classe fonctionnelle des acides carboxyliques. Le propanoate de méthyle fait partie de la classe fonctionnelle des esters.
3. La bande commune aux deux spectres IR correspond à celle de la double liaison C=O (fine et intense aux environs de 1 700 cm^{-1}), présente dans les deux molécules. La liaison qui fait la différence est la liaison O–H présente dans le groupe carboxyle de l'acide (large et intense aux environs de 3 000 cm^{-1}), et pas dans l'ester. *A* est donc le spectre de l'acide butanoïque tandis que *B* est celui du propanoate de méthyle.
Remarque : les bandes fines présentes dans le spectre IR de l'ester autour de 3 000 cm^{-1} correspondent aux liaisons C–H. Celles-ci figurent également dans le spectre de l'acide carboxylique, mais sont (au moins en partie) masquées par la large bande associée à la liaison O–H.

19. Exercice résolu dans le manuel

20. Application de l'exercice résolu
1. On identifie deux groupes caractéristiques dans l'alkannine : le groupe hydroxyle (qui apparaît 3 fois) et le groupe carbonyle (qui apparaît 2 fois), voir schéma ci-dessous.
2. Grâce à la règle de l'octet vérifiée par l'atome de carbone, on peut retrouver la formule semi-développée associée à l'alkannine :



On en déduit donc la formule brute de l'alkannine : $C_{16}H_{16}O_5$.
3. L'alkannine absorbe des radiations de longueurs d'onde situées dans le visible (400 nm $< \lambda_m =$ 520 nm $<$ 800 nm) : il s'agit donc d'une molécule de la matière colorée. Plus précisément, elle absorbe principalement dans le vert, et apparaît donc rouge en solution dans l'éthanol.
4. L'alkannine possède 6 doubles liaisons conjuguées, ce qui est juste en-dessous de la limite « habituellement » retenue pour considérer qu'une molécule organique soit un constituant de la matière colorée : « posséder au moins 7 doubles liaisons conjuguées ». Mais dans le cas de l'alkannine, il faut aussi tenir compte des deux groupes caractéristiques hydroxyle fixés sur le noyau aromatique, qui participent à la délocalisation électronique.

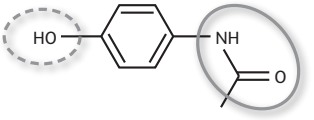
21. Apprendre à rédiger
> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, communiquer.**
a. Pour diluer cent fois la solution étalon, on prélève, par exemple, 10 mL de cette solution à l'aide d'une pipette jaugée, que l'on verse dans une fiole jaugée de 1 L, préalablement remplie au tiers d'eau distillée. On complète jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée, puis on homogénéise une dernière fois.
Il faut ensuite faire le blanc, en mesurant l'absorbance de la cuve et de l'eau distillée, puis réaliser le spectre de la solution préalablement diluée.
b. On constate tout d'abord que le spectre de la solution d'hypochlorite de sodium étalon ② est désespérément plat : cette solution n'absorbe pratiquement pas de radiations dans le visible, et elle n'est donc pas colorée. Ce ne sont donc pas les ions hypochlorite qui donnent sa couleur à l'eau de Dakin. On constate en revanche que le spectre de la solution étalon de permanganate de sodium diluée 100 fois et celui de l'eau de Dakin ont exactement la même allure : seule une homothétie les distingue, ce qui correspond à une dilution différente de l'espèce absorbante. Ce sont donc bien les ions permanganate qui colorent l'eau de Dakin.
c. D'après la loi de Beer-Lambert, pour chaque longueur d'onde : $A_\lambda = \varepsilon_\lambda \ell c$
où c est la concentration molaire en ions permanganate dans la solution, ℓ la largeur de l'échantillon traversé, et ε_λ le coefficient d'absorption molaire associé.
En se plaçant au maximum d'absorption des ions permanganate, pour λ_m = 525 nm, on relève pour la solution étalon diluée 100 fois, de concentration $c = 1{,}5 \times 10^{-4}$ mol·L^{-1} : $A_{max} = 0{,}35$.
On en déduit :

$$\varepsilon_{max} = \frac{0{,}35}{1{,}0 \times 1{,}5 \times 10^{-4}} = 2{,}3 \times 10^3 \text{ L·mol}^{-1}\text{·cm}^{-1}.$$

Puisque dans la solution de Dakin, on relève $A'_{max} = 0{,}15$; on en déduit la concentration molaire des ions permanganate dans l'eau de Dakin :

$$c' = \frac{A'_{max}}{\varepsilon_{max}\lambda} = \frac{0{,}15}{2{,}3 \times 10^3 \times 1{,}0} = 6{,}4 \times 10^{-5} \text{ mol·L}^{-1}.$$

22. Caractérisation du paracétamol
> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser.**
a.



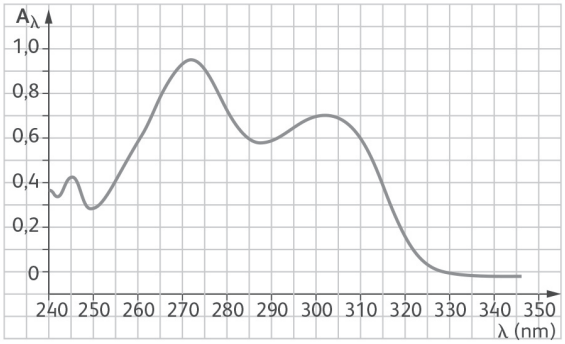
b. –OH est le groupe hydroxyle.

c. Cette molécule appartient à la classe fonctionnelle des amides.
Remarque : En revanche, elle n'appartient pas à la classe fonctionnelle des alcools, mais à celle des phénols du fait de la fixation du groupe hydroxyle sur un cycle aromatique.
d. Non, le paracétamol n'absorbe que des radiations du domaine de l'UV. La solution n'apparaît donc pas colorée.
e. La bande à 3 600 cm^{-1} correspond à la liaison O–H, celle à 3 400 cm^{-1} à la liaison N–H, celle à 3 000 cm^{-1} aux liaisons C–H, celle à 1 750 cm^{-1} à la liaison C=O et enfin celle à 1 500 cm^{-1} aux liaisons C=C.
f. En phase condensée, il apparaîtra une bande très large et de forte absorption centrée aux alentours de 3 300 cm^{-1}, correspondant aux liaisons hydrogène impliquant à la fois des liaisons N–H et des liaisons O–H entre différentes molécules présentes en solution.

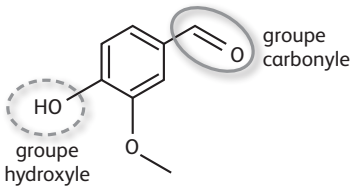
23. Étude de la vanilline

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, valider.**

a.
– Préparation de l'échantillon, suffisamment dilué pour que $A_{max} < 1{,}5$.
– Faire le blanc avec le spectrophotomètre avec une cuve remplie du solvant (ici, de l'acétate d'éthyle).
– Réaliser le spectre.



b.



c. Non : la solution de vanilline apparaît incolore sur les images. Il n'y a en effet que 4 doubles liaisons conjuguées dans la molécule. Il en faut plus de 7 pour avoir une molécule absorbant des radiations du visible.
d. On constate sur le spectre obtenu qu'aucune longueur d'onde des radiations du visible n'est absorbée. Cela confirme que la solution n'apparaisse pas colorée. Néanmoins, les rayonnements du proche-UV sont absorbés. On relève ainsi $A_{max} = 0{,}97$ pour $\lambda_m = 272$ nm.

Grâce aux données du film, on détermine la concentration molaire en vanilline :

$$c = \frac{m}{MV} = \frac{6{,}5 \times 10^{-3}}{152 \times 0{,}500} = 8{,}6 \times 10^{-5} \text{ mol·L}^{-1}$$

avec la masse molaire de la vanilline ($C_8H_8O_3$) :
$M = 8M(C) + 8M(H) + 3M(O) = 152$ g·mol^{-1}.
On peut alors remonter à la valeur du coefficient d'absorption molaire au maximum d'absorption, connaissant la largeur de la cuve utilisée $\ell = 1{,}0$ cm :

$$\varepsilon_{max} = \frac{A_{max}}{\ell c} = \frac{0{,}97}{1{,}0 \times 8{,}6 \times 10^{-5}}$$

$\varepsilon_{max} = 1{,}1 \times 10^4$ L·mol^{-1}·cm^{-1} $> 10^3$ L·mol^{-1} cm^{-1}.

La vanilline est donc une espèce fortement absorbante pour des radiations du proche-UV.
e. On compte 8 atomes de carbone, 8 atomes d'hydrogène et 3 atomes d'oxygène : $C_8H_8O_3$. Son nom dans la base de données est :
4-hydroxy-3–méthoxybenzaldéhyde.
f. La liaison C=O est très facilement repérable par sa bande d'absorption très fine et de forte absorption à 1 670 cm^{-1}. Les liaisons C=C apparaissent sous la forme d'une double bande à 1 540 et 1 590 cm^{-1}. Les liaisons C–H apparaissent vers 2 900 cm^{-1}. Et enfin, la large bande associée à la liaison O–H apparaît autour de 3 100 cm^{-1}.

24. ★ Couleur et conjugaison : l'effet bathochrome

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

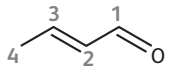
a. Plus il y a de doubles liaisons (C=C) conjuguées, plus la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption augmente.
b. En grec : « batho » signifie vers le fond, « chroma » signifie la couleur.
c. Plus le nombre de doubles liaisons conjuguées est important, plus l'énergie des photons absorbés par une molécule contenant la conjugaison est faible, et donc plus la longueur d'onde correspondante est élevée puisque $E = \frac{hc}{\lambda}$.
d. On peut extrapoler les résultats du tableau et admettre très raisonnablement que pour un nombre suffisant de doubles liaisons conjuguées, on parvienne à une valeur de λ_m suffisamment grande pour parvenir à une radiation du visible (à partir de 400 nm). Cette limite interviendra vraisemblablement pour environ 7 doubles liaisons conjuguées.
e. On dénombre 11 doubles liaisons C=C conjuguées dans le β-carotène. Cela confirme l'effet bathochrome puisque λ_m (β-carotène) = 450 nm $>$ 400 nm.
f. Puisque le β-carotène absorbe principalement les radiations de couleur bleu, il apparaît donc jaune (et pas rose : le flamant est un piège).
N. B. : en réalité, il est plutôt jaune-orangé.

25. ★ **Influence de la conjugaison en IR**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser.**

a. Ces deux molécules possèdent un groupe carbonyle. Elles font par ailleurs partie de la classe fonctionnelle des aldéhydes et à celle des alcènes.

b. Dans le but-2-énal, les deux doubles liaisons C=C et C=O sont conjuguées :



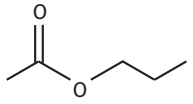
c. D'après les tables : ***a*** correspond aux liaisons C–H ; ***b*** correspond à la liaison C=O ; ***c*** correspond à la liaison C=C.

d. La conjugaison des doubles liaisons déplace les nombres d'onde du minimum des bandes d'absorption vers de plus faibles valeurs. Il s'agit du même effet bathochrome que celui observé en spectrophotométrie UV-visible (*cf.* exercice **24**).

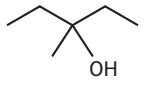
26. S'auto-évaluer

Commençons par donner les formules topologiques des différents « candidats » à partir de leur nom.

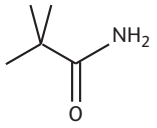
n°1 : éthanoate de propyle



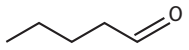
n°2 : 3-méthylpentan-3-ol



n°3 : 2,2-diméthylpropanamide



n°4 : pentanal



On identifie sur le spectre une bande (double) de forte absorption aux alentours de 1 650 cm^{-1}. Il s'agit donc a priori de la bande d'absorption d'une liaison C=O, ce qui exclut l'alcool (n°2). Mais d'après les tables, le nombre d'onde ne peut pas correspondre à la liaison C=O d'un aldéhyde (n°4) ou d'un ester (n°1), puisqu'il serait alors compris entre 1 720 et 1 750 cm^{-1}. Il s'agit donc de l'amide (n°3).

Par ailleurs, le reste du spectre confirme cette attribution. En effet, la bande fine et intense qui est centrée autour de 1 620 cm^{-1} correspond à l'absorption d'une liaison N–H (déformation).

Et on repère deux bandes larges et intenses pour 3 200 cm^{-1} et 3 400 cm^{-1} qui correspondent à l'absorption des liaisons N–H d'un amide qui possède le groupe caractéristique $-C(=O)NH_2$ (*cf.* exercice **29**).

27. ★ **In English Please**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

a. En ordonnée n'est pas portée la transmittance, mais l'absorbance. Par conséquent, les bandes d'absorption sont orientées avec des maxima d'absorption vers le haut, comme en spectroscopie UV-visible, puisque $T = 10^{-A}$.

b. On reconnaît une bande plutôt large et d'intensité moyenne pour les nombres d'onde proches de 2 900 cm^{-1}. Il s'agit de la bande caractéristique des liaisons C–H.

Par ailleurs, on reconnaît la bande assez fine et de forte absorption pour des nombres d'onde voisins de 1 700 cm^{-1}, correspondant à des liaisons C=O.

La bande à un peu moins de 1 600 cm^{-1} pourrait par ailleurs correspondre à des liaisons C=C (aromatiques) et/ou à des N–H (déformation).

c. Ce sont visiblement les liaisons C=O qui sont le plus affectées par le vieillissement du bois. Puisque leur absorption décroît dans le temps, c'est que le nombre de ces liaisons diminue dans le temps.

d. Il suffit a priori de relever la hauteur du maximum d'absorbance pour la bande relative aux liaisons C=O pour déterminer l'âge du bois. On procède ensuite par étalonnage, puisque l'on connaît la hauteur relative du maximum pour des âges de référence.

28. ★★ **Couleur et spectres UV-visible**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, valider.**

1. a. Non. D'après la photographie, la solution d'ions triiodure apparaît jaune pâle pour la plus faible concentration, et brun foncé pour la plus forte concentration, en passant par l'orange et le rouge pour les concentrations intermédiaires. La couleur perçue d'une solution d'une même espèce dépend donc considérablement de sa concentration.

b. On relève sur le spectre le maximum d'absorbance $A_{max} = 1{,}6$ (valeur un peu trop grande : on aurait dû diluer davantage la solution d'ions triiodure, ou bien prendre une cuve de 0,5 cm d'épaisseur) pour une valeur de longueur d'onde $\lambda_m = 350$ nm (environ).

On en déduit par la loi de Beer-Lambert la valeur du coefficient d'absorption molaire au maximum d'absorption :

$$\varepsilon_{max} = \frac{A_{max}}{\ell c} = \frac{1{,}6}{1{,}0 \times 2{,}6 \times 10^{-4}}$$

$\varepsilon_{max} = 6{,}2 \times 10^3$ L·mol^{-1}·cm^{-1} $> 10^3$ L·mol^{-1}·cm^{-1}.

Les ions triiodure sont donc fortement absorbants, essentiellement dans l'UV, mais aussi en partie dans le visible (cf. question suivante).

c. Le maximum de l'absorption de la solution a lieu pour des radiations de l'UV, mais on remarque que la bande d'absorption « déborde » dans le domaine du visible. Ainsi, le bleu-violet est également absorbé. La couleur complémentaire étant le jaune et le jaune-vert, il s'agit bien de la couleur perçue pour la solution.

d. D'après la loi de Beer-Lambert, l'absorbance est directement proportionnelle, pour chaque longueur d'onde, à la concentration en ions triiodure en solution. Si cette dernière augmente, l'absorbance augmente, et la bande du spectre subit une homothétie vers les plus grandes valeurs d'absorbance.
e. Il n'y a alors pas que les radiations violettes qui sont absorbées, mais aussi le bleu, puis le vert. Ainsi, la couleur perçue évolue également, passant progressivement du jaune à l'orange, puis au rouge. Le brun foncé correspond quant à lui à l'absorption de quasiment toutes les radiations du visible.
2. a. On relève un maximum de l'absorbance $A_{max} = 1{,}3$ pour une longueur d'onde $\lambda_m = 430$ nm. On en déduit, par la loi de Beer-Lambert :

$$\varepsilon_{max} = \frac{A_{max}}{\ell c} = \frac{1{,}3}{1{,}0 \times 0{,}25} = 5{,}2\ \text{L·mol}^{-1}\text{·cm}^{-1}.$$

b. $\lambda_m = 430$ nm correspond à des radiations de couleur bleu. La couleur complémentaire est donc le jaune.
c. Pour le nitrate de nickel en solution aqueuse :

$$\varepsilon_{max} = 5{,}2\ \text{L·mol}^{-1}\text{·cm}^{-1} < 10^2\ \text{L·mol}^{-1}\text{·cm}^{-1}.$$

Le nitrate de nickel est donc faiblement absorbant dans le visible.
d. On constate clairement que la couleur du nitrate de nickel n'est pas jaune, mais verte ! On n'a pas pris en compte l'existence de l'autre bande du spectre, aux alentours de 700 nm. Elle est certes moins intense, mais elle traduit l'absorption d'une bonne partie des longueurs d'onde correspondant aux radiations de couleur rouge. La couleur perçue de la solution correspond en fait à celle des radiations visibles les moins absorbées (et donc transmises), correspondant au minimum d'absorption, aux alentours de $\lambda = 550$ nm. La solution paraît effectivement verte.

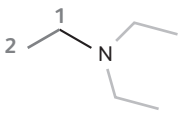
29. ★★ Identification de la classe d'une amine

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, valider.**

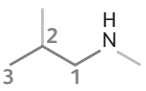
1. a.



b. Tout comme les alcools, il existe des amines primaires (une seule chaîne carbonée liée à l'atome d'azote), secondaires (deux chaîne carbonées liées à l'atome d'azote) et tertiaires (trois chaîne carbonées liées à l'atome d'azote). *A* est donc une amine tertiaire, *B* une amine secondaire, et *C* une amine primaire.
c. *C* est la 3-méthylbutan-1-amine.
d. *A* est la N,N-diéthyléthanamine :



B est la N-méthyl-2-méthylpropan-1-amine :



2. a. Dans le spectre ①, on ne discerne aucune bande d'absorption au delà de 3 000 cm^{-1}.
Dans le spectre ②, on discerne une bande double entre 3 300 et 3 400 cm^{-1}.
Dans le spectre ③, on discerne une simple bande large et intense, centrée autour de 3 300 cm^{-1}.
b. Pour les spectres ② et ③, les bandes observées correspondent aux liaisons N–H en phase condensée.
c. La seule amine qui ne possède pas de liaison N–H est l'amine tertiaire *A*, dont le spectre est le spectre ①.
d. D'après le document 2, pour une amine primaire, contenant le groupe amino $-NH_2$, il existe deux modes de vibration, donc deux énergies différentes et deux nombres d'onde différents pour l'absorption. On n'a alors pas une seule, mais deux bandes d'absorption très proches dans le spectre IR correspondant.
e. Le spectre ② contient une double bande au voisinage de 3 300 cm^{-1} : il s'agit du spectre de l'amine primaire *C*. Le spectre de l'amine secondaire *B* est donc par élimination le spectre ③.

30. ★★ Réarrangement de Beckmann

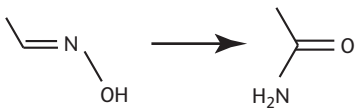
> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser.**

a. L'éthanal a pour formule brute C_2H_4O, l'hydroxylamine NH_3O, et l'éthanaloxime C_2H_5NO. On s'aperçoit donc que pour que la conservation de la matière soit respectée, la production d'une molécule d'éthanolamine s'accompagne de celle d'une molécule d'eau H_2O.
b. Equation-bilan (formules topologiques) :



éthanal — hydroxylamine — éthanaloxime — eau

c. Transformation de l'éthanoloxime en éthanamide :



éthanaloxime — éthanamide

Les deux molécules ont la même formule brute : C_2H_5NO. Elles possèdent les mêmes atomes, mais ils sont disposés différemment. Il s'agit de deux isomères (de fonction).
d. Le spectre IR de l'éthanal fera intervenir la bande caractéristique, fine et intense associée à la liaison C=O, légèrement au-dessus de 1700 cm^{-1} et ne présentera aucune autre bande d'absorption aux nombres d'onde supérieurs (si ce n'est une harmonique de cette bande principale vers 3400 cm^{-1}).
Le spectre IR de l'éthanaloxime sera le seul à ne pas faire apparaître de bande caractéristique associée à la liaison C=O (bande fine et intense aux environs de 1 700 cm^{-1}). On y distinguera en revanche la bande caractéristique de la liaison O–H (bande fine à un peu plus de 3 600 cm^{-1} en phase gazeuse, ou large et intense aux alentours de 3 300 cm^{-1}).

Enfin, le spectre de l'éthanamide fera apparaître, en plus de la bande caractéristique de la liaison C=O (bande fine et intense aux environs de 1 700 cm^{-1}) une bande caractéristique de la liaison N–H (vers 3 500 cm^{-1} en phase gazeuse).
Remarque : Puisque l'éthanamide contient le groupe caractéristique $-C(=O)NH_2$, on observera une double bande d'absorption, associée aux deux modes de vibration possible pour les liaisons N–H, (*cf.* exercice 29 précédent).
Il est donc facile de caractériser chacune des molécules par spectroscopie IR.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

31. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

L'effet de serre

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer, connaître.**

1. Le doc. 1 mentionne une température moyenne actuelle à la surface de la Terre de 15 °C (grâce à l'effet de serre), température confirmée par le document 2, qui mentionne une température de surface terrestre de 288 K = (273 + 15) K. Ces valeurs sont donc parfaitement cohérentes.
En ce qui concerne les longueurs d'onde, le document 2 prévoit une plage du visible comprise entre les valeurs λ_{min} et λ_{max} telles que :
$\log(\lambda_{min}$ en cm) = –4,45 et $\log(\lambda_{max}$ en cm) = –4,10,
soit $\lambda_{min} = 10^{-4,45}$ cm $= 3,5 \times 10^{-5}$ cm $= 3,5 \times 10^{-7}$ m
et $\lambda_{max} = 10^{-4,10}$ cm $= 7,9 \times 10^{-5}$ cm $= 7,9 \times 10^{-7}$ m, ce qui est cohérent avec les valeurs proposées par le document 3 :
0,40 µm $< \lambda_{visible} <$ 0,75 µm.
Remarque : on peut également vérifier la pertinence de la loi de Wien, aux incertitudes de mesure près :
– Pour le Soleil, la longueur d'onde relative au maximum d'émission est telle que :
$\log(\lambda_m$ en cm) = – 4,3 soit $\lambda_m = 10^{-4,3}$ cm,
d'où $\lambda_m \times T_{soleil} = 10^{-6,3} \times 6\,000 = 3,0 \times 10^{-3}$ K·m.
– Pour la Terre, la longueur d'onde relative au maximum d'émission est telle que $\log(\lambda'_m$ en cm) = – 2,9
soit $\lambda'_m = 10^{-2,9}$ cm,
d'où $\lambda'_m \times T_{terre} = 10^{-4,9} \times 288 = 3,6 \times 10^{-3}$ K.m.

2. Pertinence de l'analogie entre l'atmosphère et la vitre d'une serre :

	Vitre d'une serre	Atmosphère
Points communs	Transparence au rayonnement solaire dans le domaine du visible au moins.	
	Absorption de la plupart des rayonnements IR et UV (lointain)	
Différences	**Nature solide :** pas de mouvement de convection possible.	**Nature fluide :** présence de mouvements de convection : courants chauds ascendants, vent.
	Délimitation nette.	**Limites « floues » :** quand passe-t-on de l'atmosphère terrestre au vide sidéral ?
	Milieu uniforme : composition (et température) identique en tout point.	**Milieu non uniforme :** composition variable, avec des nuages par endroit (contenant de la vapeur d'eau et/ou de la glace), de l'ozone essentiellement présent dans la stratosphère, et une atmosphère se raréfiant en altitude. Température fluctuante, aussi bien selon l'altitude que la position sur Terre.

3. On constate en comparant les différents spectres d'absorption que c'est la vapeur d'eau qui présente le plus large spectre d'absorption dans le domaine de l'infrarouge. Elle a toujours été l'origine principale de l'effet de serre, initialement nécessaire à la présence de la vie sur Terre, comme le rappelle le dernier paragraphe du document 1.
Malheureusement, on constate que cette absorption est complétée par celle des quatre autres gaz dont les spectres sont fournis, et qui sont présents dans l'atmosphère. La présence de ces gaz a certes une origine qui peut être naturelle (ozone stratosphérique, bien utile pour bloquer une grande partie des UV lointains émis par le Soleil, méthane produit par la dégradation de la matière organique, dioxyde de carbone rejeté par la respiration des êtres vivants et le volcanisme, etc.), mais il est prouvé que l'origine anthropique de ces gaz (élevage et combustions, notamment) est bien plus important (plus de 100 fois plus important en ce qui concerne les rejets en dioxyde de carbone, par exemple).
En augmentant la teneur de ces gaz dans l'atmosphère, l'effet de serre ne peut a priori que s'amplifier, et être à l'origine d'une élévation de la température terrestre moyenne. Ironie du sort, cette élévation de température a pour conséquence d'augmenter la teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui est le gaz a effet de serre le plus « efficace ».
Cela dit, les mécanismes de régulation étant nombreux et complexes, il est très difficile de prévoir avec certitude l'évolution de la situation.

CHAPITRE 6

OBSERVER

Spectres de RMN

> Manuel pages 124 à 147

Choix pédagogiques

Ce chapitre suit immédiatement le chapitre sur les autres techniques spectroscopiques : IR et UV-visible.
Pour les lycées ne disposant pas de spectromètre de RMN, certains exercices ou activités ont recours à l'utilisation d'un logiciel simulant les spectres.
Le texte du BO insiste sur l'interprétation des spectres. Nous avons donc choisi de privilégier cet aspect, sans définir complètement le déplacement chimique dans le cours.
Nous avons souhaité aborder le principe physique de la spectroscopie de RMN en première activité pour que les élèves puissent connaître la nature du phénomène mis en jeu. Les activités suivantes permettent de mettre en place la démarche de lecture d'un spectre à partir de spectres de RMN simples.
traité au chapitre 3 avec les ondes sonores.
Des animations illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Le phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN) a été découvert après la Seconde Guerre mondiale. Cette découverte a donné naissance à la spectroscopie de RMN, et c'est la résonance magnétique du noyau d'atome d'hydrogène qui a été spécifiquement étudiée pour développer l'IRM.

Pourquoi avoir choisi le noyau d'atome d'hydrogène pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ?

Le corps humain est majoritairement constitué d'eau (et de molécules organiques). Comme le noyau d'atome d'hydrogène (présent dans toutes les molécules d'eau et molécules organiques) donne lieu au phénomène de résonance magnétique nucléaire, il est intéressant de choisir ce noyau pour l'imagerie du corps humain par IRM.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Principe physique de la RMN

Commentaires

Cette activité est une première approche, très simplifiée, du principe physique de la RMN. L'analogie avec les aiguilles aimantées permet de se familiariser avec les propriétés magnétiques de certains noyaux. On s'appuie sur les connaissances de 1re S sur la quantification des niveaux d'énergie dans la matière et sur la dualité ondes-corpuscules de la lumière.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. La RMN est un phénomène qui met en jeu les propriétés magnétiques de certains noyaux en présence d'un champ magnétique. La RMN implique donc le noyau, et non les électrons, de certains atomes.

b. Le phénomène de RMN s'observe en présence d'un champ magnétique.

ANALYSER

2. Le noyau cité dans le texte est le noyau d'hydrogène ^{1}H. Or, les molécules organiques sont très majoritairement constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène. Une spectroscopie s'appuyant sur les propriétés de noyaux d'atomes d'hydrogène (^{1}H) semble donc particulièrement adaptée aux molécules organiques.

RÉALISER

3. La différence d'énergie entre les deux états possibles du noyau d'hydrogène ^{1}H est donnée par :
$\Delta\mathscr{E} = k \times B_{\text{appareil}}$.
Pour passer d'un état d'énergie à l'autre, un noyau d'atome d'hydrogène ^{1}H doit absorber un photon transportant le quantum d'énergie $\Delta\mathscr{E} = h\nu$.
On en déduit $h\nu = k \times B_{\text{appareil}}$ soit $\nu = \dfrac{k \times B_{\text{appareil}}}{h}$.
A.N. : $\nu = \dfrac{2{,}82 \times 10^{-26} \times 4{,}70}{6{,}63 \times 10^{-34}} = 2{,}00 \times 10^{8}$ Hz = 200 MHz.
Cette radiation appartient au domaine des ondes électromagnétiques radio.

ANALYSER

4. D'après la relation de la question précédente $\nu = \dfrac{k \times B_{\text{appareil}}}{h}$, si le champ magnétique a une valeur double, la valeur de la fréquence de résonance est aussi multipliée par deux.
La fréquence de résonance d'un noyau dépend donc du champ magnétique du spectromètre utilisé, ce qui rend difficiles les comparaisons entre les mesures effectuées avec des appareils différents.

VALIDER

5. Si on divise la valeur de la fréquence de résonance par la valeur du champ magnétique produit par le spectromètre, on obtient une nouvelle grandeur qui ne dépend plus du spectromètre utilisé.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Première lecture d'un spectre de RMN

Commentaires

Cette activité propose d'emblée un spectre de RMN du noyau d'atome d'hydrogène (couramment appelé « spectre de RMN du proton ») : l'observation de l'axe des abscisses permet d'introduire une nouvelle grandeur, liée à la fréquence de résonance, mais dont la définition ne sera pas explicitée. Tous les noyaux des atomes d'hydrogène d'une même molécule n'ont pas forcément le même déplacement chimique, ce qui rend intéressante la spectroscopie de RMN pour avoir des informations sur la structure d'une molécule.

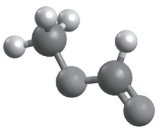
Dans un premier temps, une démarche guidée permet d'établir le lien entre la structure d'une molécule et des observations simples faites sur son spectre de RMN du proton (à la fois sur les signaux et sur la courbe d'intégration). Dans un second temps, la même démarche peut être appliquée à d'autres exemples de spectres pour en déduire l'influence de l'électronégativité d'un atome sur les signaux.

Réponses

S'APPROPRIER

1. L'axe des abscisses est orienté de droite à gauche.

2.

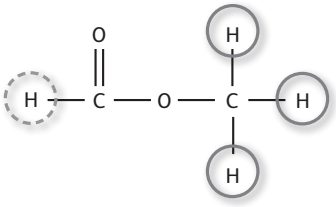


ANALYSER

3. a. Les trois atomes d'hydrogène entourés à droite sont équivalents : on passe de l'un à l'autre par simple rotation autour d'une liaison C – O.

L'atome d'hydrogène entouré à gauche n'a pas d'équivalent dans la molécule.

Il y a donc deux groupes d'atomes d'hydrogène équivalents : l'atome d'hydrogène (lié à l'atome de carbone du groupe caractéristique) entouré à gauche d'une part, et les trois atomes d'hydrogène du groupe méthyle d'autre part.



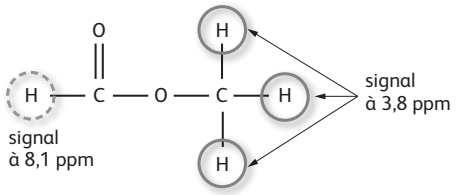
b. Ce repérage est cohérent avec le nombre de signaux du spectre. Il y a autant de signaux sur le spectre (deux ici) que de groupes d'atomes d'hydrogène équivalents (deux aussi ici).

RÉALISER

4. $h_a = 1{,}5$ cm et $h_b = 0{,}5$ cm, donc $\frac{h_a}{h_b} = 3$.

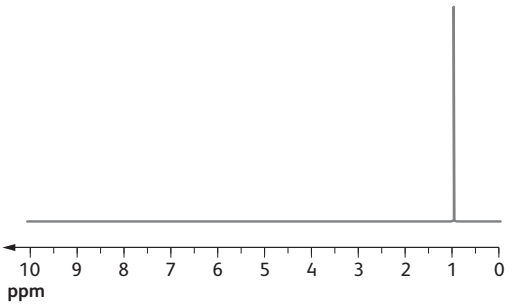
ANALYSER

5. La hauteur du saut de la courbe d'intégration est proportionnelle au nombre de noyaux correspondants. Or la hauteur du saut le plus grand (à 3,8 ppm) est le triple de celle du saut le plus petit (à 8,1 ppm). Le signal à 3,8 ppm correspond donc à trois noyaux d'atomes d'hydrogène équivalents (ceux du groupe méthyle) et le signal à 8,1 ppm correspond à l'atome d'hydrogène lié à l'atome de carbone du groupe ester.

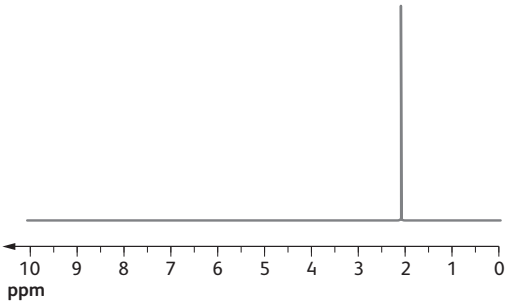


RÉALISER

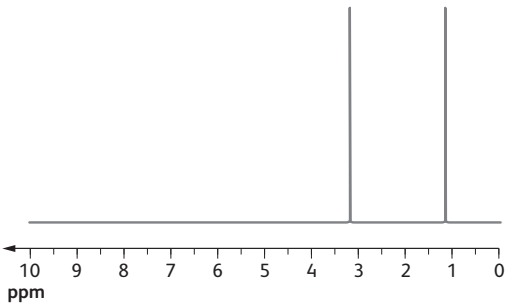
6. Diméthylpropane



Triméthylamine

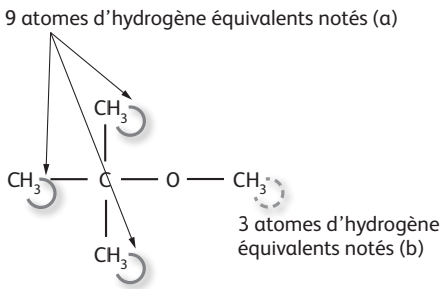


Méthoxyméthylpropane



ANALYSER

7. Dans le 2,2-diméthylpropane comme dans la triméthylamine, tous les atomes d'hydrogène sont équivalents.
Dans le 2-méthoxy-2-méthylpropane, il y a deux groupes d'atomes d'hydrogène équivalents :



Ce repérage est cohérent avec le nombre de signaux observés sur chaque spectre : un seul signal pour le 2,2-diméthylpropane et la triméthylamine, et deux signaux pour le 2-méthoxy-2-méthylpropane.

VALIDER

8. Le spectre du 2,2-diméthylpropane fait apparaître un signal vers 1 ppm, celui de la triméthylamine un signal vers 2 ppm, et l'un des signaux du 2-méthoxy-2-méthylpropane est au-delà de 3 ppm.
Or le 2,2-diméthylpropane ne comporte que des atomes de carbone et d'hydrogène, tandis que la triméthylméthanamine comporte (en plus des atomes de carbone et d'hydrogène) un atome d'azote et le 2-méthoxy-2-méthylpropane un atome d'oxygène.
Conclusion : la présence d'un atome électronégatif dans la molécule donne sur le spectre un signal à un déplacement chimique d'autant plus grand que cet atome est électronégatif.
Dans le spectre du 2-méthoxy-2-méthylpropane, on remarque que les noyaux notés (b) ont un déplacement chimique plus grand que ceux notés (a), plus éloignés de l'atome d'oxygène que les (b). La plus ou moins grande proximité d'un atome électronégatif a donc aussi un rôle sur le déplacement chimique d'un noyau.

3. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Multiplicité d'un signal sur un spectre de RMN

Commentaires

Cette activité présente le spectre de RMN d'une molécule, et fait observer dans un premier temps que les signaux peuvent avoir des structures différentes. On met en évidence ensuite le lien entre la forme du signal et la structure de la molécule.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Le signal à 4,1 ppm comporte quatre pics. On peut donc l'appeler « quadruplet ». Le signal à 1,3 ppm, qui comporte un seul pic, est un singulet.

ANALYSER

2. a. Les sauts de la courbe d'intégration à 1,3 et à 2,0 ppm ont des hauteurs égales (1,2 cm). La hauteur du saut pour le signal à 4,1 ppm est inférieure (0,8 cm) : le signal à 4,1 ppm correspond donc à un groupe d'atomes d'hydrogène équivalents moins nombreux que ceux des autres signaux. On en déduit que le signal à 4,1 ppm correspond aux deux noyaux d'atomes d'hydrogène notés (b).
b. Les groupes d'atomes d'hydrogène (b) et (c) sont considérés comme voisins selon cette définition.
c. Les seuls atomes d'hydrogène qui n'ont pas de voisins sont ceux qui sont notés (a) : ce sont eux qui correspondent au singulet. Le signal à 2,0 ppm correspond donc à la résonance des noyaux d'atomes d'hydrogène notés (a). Le signal à 4,1 ppm ayant déjà été attribué, on en déduit que le signal à 1,3 ppm correspond aux noyaux des atomes d'hydrogène (c).

RÉALISER

3.

Atomes d'hydrogène	notés (a)	notés (b)	notés (c)
Déplacement chimique de leurs noyaux	2,0 ppm	4,1 ppm	1,3 ppm
Nombre de pics dans le signal	1	4	3
Nombre d'atomes d'hydrogène équivalents voisins	0	3	2

VALIDER

4. Nombre de pics du signal = nombre d'atomes d'hydrogène voisins + 1
Remarque :

1er noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène (c)	↑	↑	↓	↓
2e noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène (c)	↓	↑	↑	↓
Bilan	↑↓	↑↑	↓↑	↓↓

On remarque que quatre situations sont possibles, mais deux ont le même bilan : ↑↓ et ↓↑.
Les noyaux des atomes d'hydrogène (c) peuvent donc être situés dans trois champs magnétiques d'intensités différentes : trois fréquences de résonances, et donc trois déplacements chimiques sont donc possibles, ce qui explique la structure du signal sous la forme de trois pics.
De plus, le bilan commun à deux situations différentes ↑↓ et ↓↑ est deux fois plus probable que chacun des deux autres (↑↑ ou ↓↓), ce qui explique que le pic central soit deux fois plus intense que chacun des deux autres pics.

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
La RMN au service de la biologie

S'APPROPRIER

1. a. On fait appel à la mécanique quantique pour modéliser le phénomène de RMN.
b. La RMN permet d'accéder à la structure atomique des molécules (formule développée et structure tridimensionnelle) mais aussi à la structure de matériaux comme le verre, le béton.

c. La RMN peut permettre d'analyser la surface de matériaux (verre, béton) mais aussi des molécules en biologie : protéines, ADN, etc.

COMMUNIQUER

2. La RMN :

– donne accès à la **structure des macromolécules** intervenant dans les phénomènes biologiques, qu'il s'agisse des protéines (participant aux mécanismes immunitaires, à la structure et au fonctionnement des enzymes, aux réactions de synthèse dans les cellules) ou de l'ADN, de l'ARN (stockage, transport de l'information génétique). La RMN permet non seulement de connaître l'enchaînement des atomes dans ces macromolécules, mais aussi la structure en trois dimensions. Cette connaissance est d'autant plus intéressante que la structure tridimensionnelle de ces macromolécules est liée à leur fonction dans la cellule.

– permet d'avoir ces informations sur la cinétique de mouvements et d'interactions entre protéines (exemple de l'ubiquitine qui se fixe à d'autres protéines et intervient dans le mécanisme de la réponse immunitaire).

– permet d'avoir des informations sur des réactions chimiques (acido-basiques) entre certaines protéines et l'eau.

EXERCICES Appliquer le cours

Qu'est-ce qu'un spectre de RMN ? (§1 du cours)

13. Comprendre le vocabulaire

La spectroscopie de RMN du proton utilise la résonance des noyaux d'atomes d'hydrogène 1 d'une molécule. Or un noyau d'atome d'hydrogène 1 est uniquement constitué d'un proton. Quand on parle de protons en RMN, on s'intéresse uniquement aux noyaux d'atomes d'hydrogène, et non aux protons des noyaux des autres atomes présents dans la molécule étudiée.

14. Choisir des noyaux pour la RMN

a. Deux noyaux isotopes peuvent avoir des propriétés magnétiques différentes : par exemple, un noyau d'atome de carbone 12 est inactif en RMN, tandis qu'un noyau d'atome de carbone 13 est actif.

b. C'est le noyau d'atome d'hydrogène ^{1}H qui est le plus étudié en RMN par les chimistes organiciens :

– il est sensible à la présence d'un champ magnétique ;

– cet isotope est très abondant naturellement par rapport aux autres isotopes de l'hydrogène ;

– il est très abondant dans les molécules organiques.

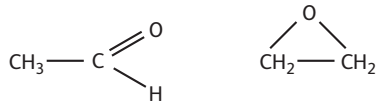
c. Les molécules organiques étant constituées majoritairement d'atomes de carbone et d'hydrogène, l'étude en RMN de noyaux d'atomes de carbone pourrait apporter des informations sur les molécules organiques, à condition que les molécules aient des noyaux d'atomes de carbone magnétiquement actifs. Or l'élément carbone est constitué de 1,11 % de carbone 13 : les molécules organiques peuvent donc être étudiées en RMN du carbone 13.

Remarque : d'autres noyaux peuvent aussi être étudiés, s'ils sont présents dans les molécules : le noyau de phosphore 31, de l'azote 15, du fluor 19, etc.

Les informations d'un spectre de RMN (§2 du cours)

15. Identifier une molécule

a. Il y a trois formules semi-développées correspondant à la formule brute C_2H_4O :



et $CH_2{=}CH-OH$.

b. Le signal à 9,79 ppm correspond ici à un proton lié à un groupe carbonyle. La molécule étudiée est donc l'éthanal $CH_3-CH{=}O$.

16. Identifier les protons équivalents

a. Le spectre présente un signal, donc tous les protons sont équivalents

b. Les protons des deux groupes $-CH_3$ ont le même environnement chimique, donc sont bien équivalents.

17. Identifier les protons équivalents

a. Le spectre comporte trois signaux : il y a donc trois groupes de protons équivalents dans la molécule, ce qui est cohérent avec la formule de la molécule :

$\mathbf{C}H_3-CH_2-\mathbf{O}H$

b. Le saut de la courbe d'intégration pour le signal vers 1 ppm est trois fois plus grand que celui pour le signal vers 5,5 ppm : le signal à 1 ppm correspond donc aux trois protons du groupe méthyle $\mathbf{C}H_3-$ et le signal à 5,5 ppm correspond au proton du groupe hydroxyle $-\mathbf{O}H$. On en déduit que le troisième signal (vers 3,5 ppm) correspond aux deux protons de $-\mathbf{C}H_2-$.

On vérifie que le saut correspondant au signal à 3,5 ppm est deux fois plus grand que celui à 5,5 ppm : le signal à 3,5 ppm correspond donc aux deux protons de $-CH_2-$.

18. Déterminer le nombre de voisins

a. Le signal vers 1 ppm est un triplet, et celui vers 3,5 ppm est un quadruplet.

b. Les protons du triplet ont comme voisins $3 - 1 = 2$ protons équivalents entre eux, et les protons du quadruplet ont comme voisins à $4 - 1 = 3$ protons équivalents entre eux.

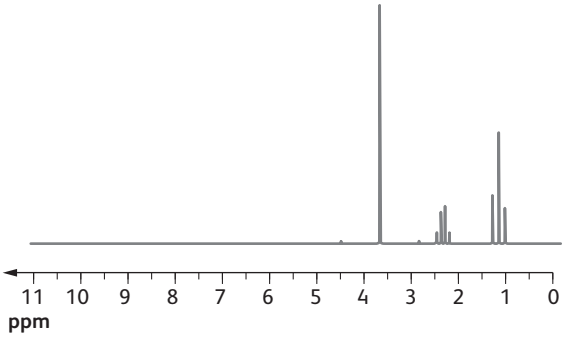
Ceci est cohérent avec la présence d'un groupe éthyle $\mathbf{C}H_3-\mathbf{C}H_2-$ dans l'éthanol : les protons de $\mathbf{C}H_3-$ ont comme voisins les deux protons de $-\mathbf{C}H_2-$, et les protons de $-\mathbf{C}H_2-$ ont comme voisins les trois protons de $\mathbf{C}H_3-$.

19. Tracer l'allure d'un spectre de RMN

a. Les trois protons du signal à 1,15 ppm ont deux protons voisins : le signal à 1,15 ppm a donc $2 + 1 = 3$ pics, c'est un triplet.

Les trois protons du signal à 2,32 ppm ont trois protons voisins : le signal à 2,32 ppm a donc 3 + 1 = 4 pics, c'est un quadruplet.
Le signal à 3,67 ppm correspond à des protons n'ayant pas de protons voisins : le signal à 3,67 ppm est donc un singulet.

b.

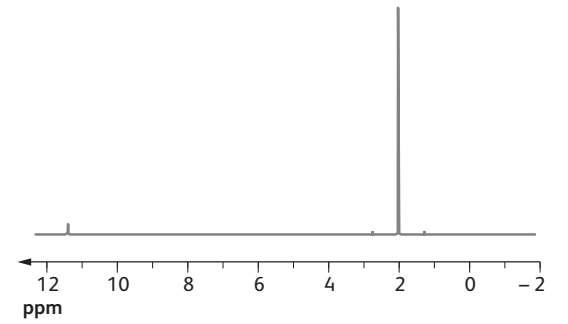


Pour que le spectre soit complet, il faut aussi tracer la courbe d'intégration.
Les signaux à 1,15 ppm et 3,67 ppm correspondent chacun à trois protons : les sauts correspondant dans la courbe d'intégration ont donc la même hauteur.
Le signal à 2,32 ppm correspond à deux protons : le saut de la coube d'intégration à 2,32 ppm est donc $\frac{3}{2} = 1{,}5$ fois plus petit que les deux autres sauts.

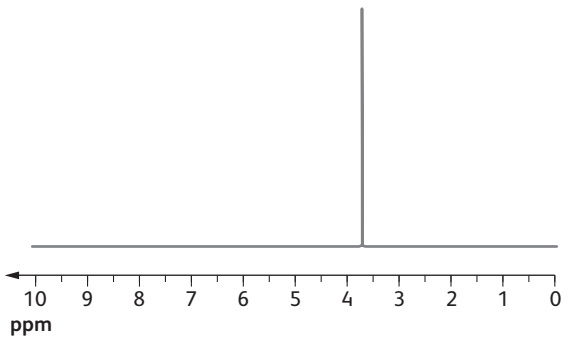
20. Utiliser un logiciel de simulation

a. $CH_3-(C=O)-OH$: pas de protons voisins, donc uniquement des singulets.
$CH_3-CH_2-N(CH_3)_2$: les protons de CH_3- ont deux voisins ; les protons de $-CH_2-$, qui ont eux-mêmes trois protons voisins ; les trois protons du groupe méthyle CH_3-. Le spectre de RMN du proton présentera donc un triplet et un quadruplet. Les protons des deux groupes méthyle liés à l'atome d'azote n'ont pas de proton voisin et donnent donc un singulet.
$Br-CH_2-CH_2-Br$: tous les protons sont équivalents, on observera un unique singulet.
$CH_3-CHCl-CH_3$: les six protons équivalents des deux groupes CH_3- ont un proton voisin ; celui de $-CHCl-$. De même, le proton de $-CHCl-$ a six protons équivalents entre eux comme voisins. Le spectre présentera donc deux multiplets.

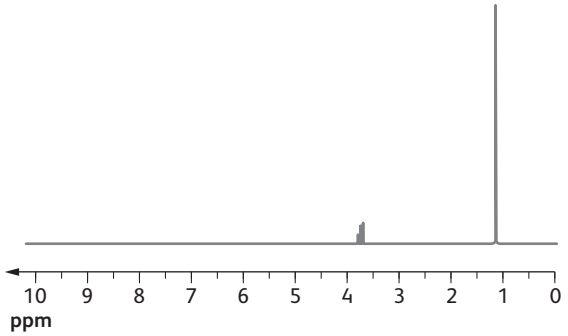
b. Le spectre de RMN de $CH_3-(C=O)-OH$ présente bien seulement des singulets (deux) :



Le spectre de $Br-CH_2-CH_2-Br$ comporte bien un seul singulet :



Le spectre de $CH_3-CHCl-CH_3$ présente bien deux multiplets (un doublet – peu visible sur le spectre ci-après – correspondant aux six protons équivalents des deux groupes méthyle, ayant pour voisin un seul proton, et un septuplet correspondant au proton sur l'atome de carbone en milieu de chaîne, ce proton ayant six protons voisins) :



21. Interpréter un texte de vulgarisation

Les indices auxquels Jean-Marie Lehn fait allusion sont :
– le nombre de signaux apparaissant sur le spectre
– le déplacement chimique des signaux (autrement dit leur position sur le spectre)
– la forme des signaux
– les hauteurs relatives des sauts de la courbe d'intégration.

EXERCICES S'entraîner

22. Exercice résolu dans le manuel

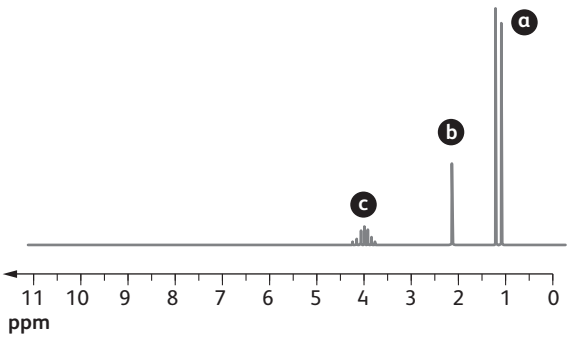
23. Application de l'exercice résolu

1. Les deux molécules comportent chacune quatre groupes de protons équivalents. Le nombre de signaux sur le spectre ne permet donc pas d'attribuer le spectre à l'une des deux molécules *A* ou *B*.
2. Dans la molécule *A*, les protons des deux groupes méthyle n'ont pas de proton voisin, ils correspondent donc à deux singulets sur le spectre. Les protons de chaque groupe $-CH_2-$ ont chacun deux protons voisins équivalents, et correspondent donc à deux triplets sur le spectre.

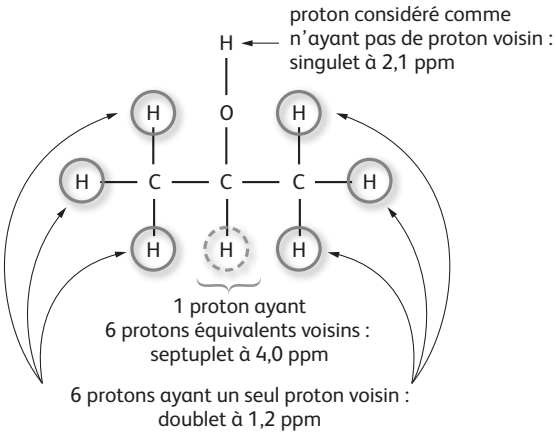
Dans la molécule *B*, on trouve l'association triplet-quadruplet correspondant au groupe $-CH_2-CH_3$. Les protons du groupe méthyle lié au carbonyle, n'ont pas de proton voisin, et donnent donc un singulet, de même que les protons du groupe $-CH_2-$ lié au carbonyle. Le spectre doit donc présenter deux singulets, un triplet et un quadruplet.
Le spectre donné dans cet exercice correspond donc à la molécule *A*.

24. Exercice résolu dans le manuel

25. Application de l'exercice résolu

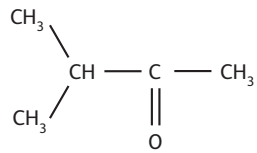


1. Le spectre fait apparaître trois signaux : la molécule contient trois types de protons. Cette information permet ici d'éliminer le propan-1-ol, qui a 4 types de protons : $CH_3-CH_2-CH_2-OH$.
2. Analysons la multiplicité de chaque signal.
Le septuplet à 4,0 ppm correspond à un proton ayant pour voisins 6 protons équivalents, c'est le proton situé sur l'atome de carbone central du propan-2-ol.
Le doublet à 1,2 ppm correspond à 6 protons équivalents ayant un seul proton voisin : les 6 protons des groupes méthyle couplés au proton lié à l'atome de carbone central. Le singulet à 2,1 ppm correspond au proton du groupe hydroxyle : ce proton n'est pas considéré comme voisin des autres protons de la molécule lorsque le tube de mesure contient des traces d'eau (ce qui est presque toujours le cas).

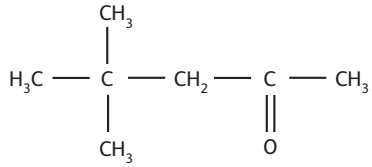


Vérifions la cohérence des conclusions précédentes avec une table de déplacements chimiques.
Sur le spectre donné, le signal à 4,0 ppm (septuplet) correspond au proton situé sur le même atome de carbone que le groupe hydroxyle : on est bien dans la fourchette [3,1 ppm – 4,0 ppm] des protons liés à un atome de carbone, lui-même lié à un atome électronégatif.
Le signal à 2,1 ppm peut bien être celui du proton d'un groupe hydroxyle, et celui à 1,2 ppm correspond bien à des protons sur une chaîne carbonée linéaire.
3. Analysons à présent la courbe d'intégration.
On choisit le palier le plus petit (ici le ⓒ) et on calcule le rapport de la hauteur de chaque palier sur celle du plus petit : ici $\frac{h_a}{h_c} = 6$ et $\frac{h_b}{h_c} = 1$. Il y a donc le même nombre (noté *n*) de protons du type ⓑ et du type ⓒ et 6 fois plus de protons du type ⓐ.
La molécule comportant 8 protons : $n + n + 6n = 8$, d'où $n = 1$.
La molécule a donc trois groupes de protons équivalents de 1, 1 et 6 protons, respectivement à 4,0 ppm, 2,1 ppm et 1,2 ppm : la molécule est du propan-2-ol et non du méthoxyéthane (contenant trois groupes de protons équivalents, de 3, 3 et 2 protons).

26. Apprendre à rédiger
> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, analyser.**
a. 3-méthylbutan-2-one : 3 groupes de protons équivalents (6,1,3)

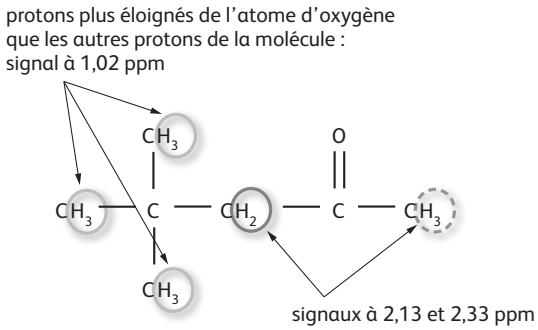


4,4-diméthylpentan-2-one : 3 groupes de protons équivalents (9,2,3)

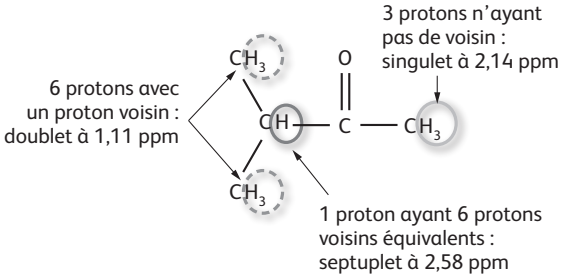


b. Dans la 4,4-diméthylpentan-2-one, aucun des protons n'a de protons voisins : le spectre de RMN de cette molécule ne doit présenter que des singulets.
Dans la 3-méthylbutanone, les 6 protons équivalents (deux groupes méthyle) ont un proton voisin et vont donc donner un doublet. Le proton du groupe CH a 6 protons voisins et va donc donner un septuplet. Enfin, les protons du méthyle lié au carbonyle n'ont pas de proton voisin et apparaissent donc sous forme d'un singulet.
c. Le spectre B ne présente que des singulets, il s'agit du spectre de la 4,4-diméthylpentan-2-one. Le spectre A est celui de la 3-méthylbutanone.

d. Spectre B (4,4-diméthylpentan-2-one) :



Deux groupes de protons sont à même distance de l'atome d'oxygène ; les protons de – CH_2 – et les protons du groupe CH_3 – lié au carbonyle. Ils ont des déplacements chimiques voisins, de 2,13 ppm et 2,33 ppm, mais on ne peut attribuer sans information complémentaire chacun de ces deux signaux. Il faudrait disposer de la courbe d'intégration pour attribuer ces deux signaux. Les autres protons (9 protons équivalents entre eux) sont plus éloignés de l'atome d'oxygène, leur déplacement chimique est de 1,02 ppm.
Spectre A :



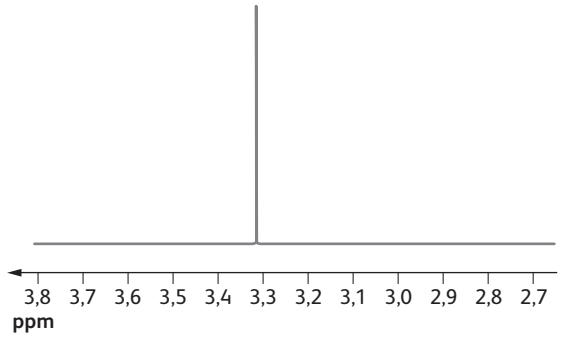
Le groupe de 6 protons équivalents est plus éloigné de l'atome d'oxygène que les autres groupes de protons de la molécule : ces 6 protons ont donc un déplacement chimique inférieur à celui des autres protons de la molécule.

27. Amines

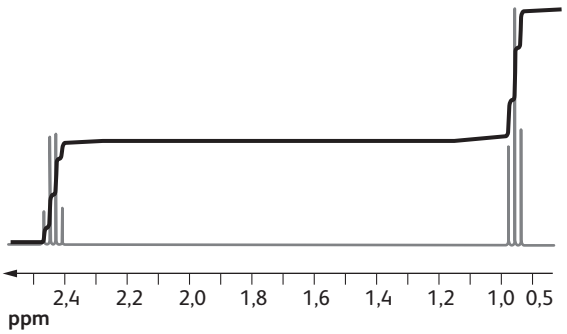
> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider, communiquer.**

a. Tous les protons de la N,N-diméthylméthanamine (triméthylamine) sont équivalents. En effet, les trois protons d'un même groupe méthyle CH_3– sont équivalents entre eux. De plus, un logiciel de modélisation moléculaire permet de voir que deux groupes méthyle sont symétriques l'un de l'autre par rapport à un plan de symétrie de la molécule (contenant le 3e groupe méthyle).
Par analogie, on en déduit que la N,N-diéthyléthanamine (triéthylamine) possède deux groupes de protons équivalents :
– l'un formé des 9 protons (notés [a]) appartenant aux trois groupes méthyle CH_3–
– l'autre formé des 6 protons (notés [b]) appartenant aux trois –CH_2–

b. Dans la triméthylamine, tous les protons sont équivalents entre eux : le spectre fera apparaître un seul signal (singulet).
Dans la triéthylamine, chacun des 9 protons [a] a deux protons voisins : le signal attendu est un triplet. Chacun des 6 protons [b] a trois protons voisins : le signal attendu est un quadruplet.
c. Le spectre de la triméthylamine fait bien apparaître un seul singulet



Le spectre de la triéthylamine fait bien apparaître deux signaux, un triplet et un quadruplet. Le triplet correspond à 9 protons et le quadruplet à 6 protons, et le saut de la courbe d'intégration correspondant au triplet est bien $\frac{9}{6} = 1{,}5$ fois plus grand que le saut correspondant au quadruplet.



d. Les 9 protons [a] (triplet) sont plus loin de l'atome d'azote (électronégatif) que les 6 protons [b] (quadruplet) : on observe bien sur le spectre que le quadruplet a un déplacement chimique plus grand que le triplet.

28. Identification d'une molécule

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. Le spectre présente trois signaux, la molécule correspondante a donc trois groupes de protons équivalents.
b. Le saut de la courbe d'intégration correspondant au signal à 1,2 ppm (triplet) est trois fois plus haut que celui à 8 ppm (singulet), et 1,5 fois plus haut que celui vers 4,3 ppm (quadruplet). Le triplet correspond donc à 3 protons, le quadruplet à 2 protons et le singulet à 1 proton.
c. Les 3 protons du triplet sont couplés à 2 protons, et les 2 protons du quadruplet sont couplés à 3 protons : on reconnaît le groupe CH_3–CH_2–.

d. La molécule étudiée est l'acide propanoïque : $CH_3-CH_2-C(=O)-OH$.
e. Le spectre IR présente une bande vers 3000 cm^{-1} (C=O), et une bande vers 1700 cm^{-1} (liaison O–H).

29. Identification d'une molécule

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

a. La hauteur du saut de la courbe d'intégration est proportionnelle au nombre de protons responsables du signal : le triplet correspond donc à $\frac{3}{2} = 1{,}5$ fois plus de protons que le quadruplet.
On note n le nombre de protons responsables du triplet et n' le nombre de protons responsables du quadruplet : $n = 1{,}5\ n'$.
La formule brute de la molécule étant $C_4H_{10}O$, on a aussi : $n + n' = 10$.
On en déduit : $1{,}5\ n' + n' = 10$, soit $2{,}5\ n' = 10$, soit $n' = 4$.
Donc $n = 1{,}5\ n' = 6$.
Le triplet correspond donc à 6 protons et le quadruplet à 4 protons.
b. Le triplet correspond à des protons ayant deux protons voisins, et le quadruplet correspond à des protons ayant trois protons voisins : on reconnaît l'association des deux signaux caractéristique du groupe éthyle CH_3-CH_2-.
Le triplet correspondant à 6 protons et le quadruplet correspondant à 4 protons, la cétone étudiée a vraisemblablement un plan de symétrie, et est donc l'éthoxyéthane : $CH_3-CH_2-O-CH_2-CH_3$
Remarque : le signal correspondant aux protons des $-CH_2-$ (quadruplet à 3,4 ppm) a un déplacement chimique supérieur à celui du signal des protons des $-CH_3$ (triplet à 1,1 ppm), car les $-CH_2-$ sont plus proches de l'atome le plus électronégatif de la molécule, l'atome d'oxygène.

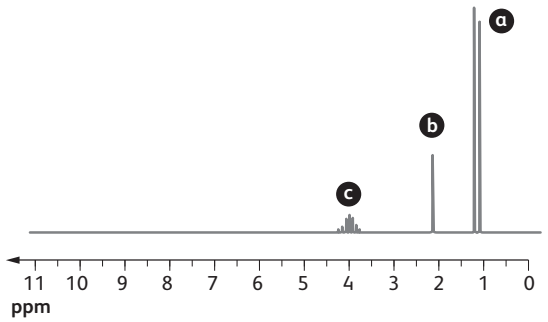
30. À qui appartiennent ces spectres ?

> COMPÉTENCES : **Réaliser, analyser.**

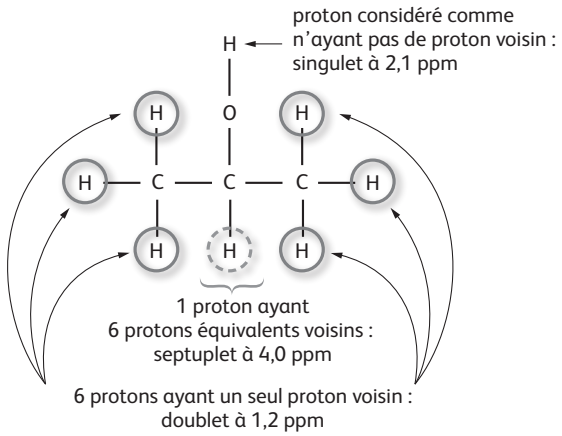
a. Les deux molécules étudiées sont le méthanol CH_3-OH, et le méthanal $HC=O$.
L'un des deux spectres fait apparaître un seul signal : la molécule correspondante contient un seul type de protons, il s'agit donc du méthanal (spectre *A*).
L'autre spectre comporte deux signaux, la molécule correspondante contient donc deux types de protons : c'est le cas du méthanol (spectre *B*) ; les trois protons, équivalents entre eux, du groupe méthyle CH_3-, et le proton du groupe hydroxyle.
Ces conclusions sont cohérentes avec la table simplifiée de déplacements chimiques : le proton du méthanal a un déplacement chimique de 9,60 ppm (spectre *A*), compris dans la fourchette [9,5 – 11 ppm] d'un proton lié à l'atome de carbone d'un groupe carbonyle.
Dans le spectre B, les deux déplacements chimiques (3,43 et 3,66 ppm) correspondent bien aux types de protons du méthanol : le proton de groupe hydroxyle (dans la fourchette [0,5 – 5,5 ppm]) et les protons du groupe méthyle, donc liés à un atome de carbone lui-même lié à un atome électronégatif (fourchette [3,1 – 4,0 ppm]).

31. ★ Composé de référence historique

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**



Le spectre de l'exemple étudié fait apparaître 3 signaux : la molécule contient trois types de protons. Cette information permet ici d'éliminer le propan-1-ol, qui a 4 types de protons : $\mathbf{CH_3-CH_2-CH_2-OH}$.
Analysons à présent la courbe d'intégration.
On choisit le palier le plus petit (ici le ⓒ) et on calcule le rapport de la hauteur de chaque palier sur celle du plus petit : ici $\frac{h_a}{h_c} = 6$ et $\frac{h_b}{h_c} = 1$. Il y a donc le même nombre (noté n) de protons du type ⓑ et du type ⓒ et 6 fois plus de protons du type ⓐ.
La molécule comportant 8 protons : $n + n + 6\ n = 8$, d'où $n = 1$.
La molécule a donc trois groupes de protons équivalents de 1, 1 et 6 protons, respectivement à 4,0 ppm, 2,1 ppm et 1,2 ppm : la molécule est du propan-2-ol et non du méthoxyéthane (contenant trois groupes de protons équivalents, de 3, 3 et 2 protons).
Analysons la multiplicité de chaque signal.
Le septuplet à 4,0 ppm correspond à un proton ayant pour voisins 6 protons équivalents, c'est le proton situé sur l'atome de carbone central du propan-2-ol.
Le doublet à 1,2 ppm correspond à 6 protons équivalents ayant un seul proton voisin : les 6 protons des groupes méthyle couplés au proton lié à l'atome de carbone central. Le singulet à 2,1 ppm correspond au proton du groupe hydroxyle : ce proton n'est pas considéré comme voisin des autres protons de la molécule lorsque le tube de mesure contient des traces d'eau (ce qui est presque toujours le cas).



Vérifions la cohérence des conclusions précédentes avec une table de déplacements chimiques.
Sur le spectre donné, le signal à 4,0 ppm (septuplet) correspond au proton situé sur le même atome de carbone que le groupe hydroxyle : on est bien dans la fourchette [3,1 ppm – 4,0 ppm] des protons sur un atome de carbone lié à un atome électronégatif.
Le signal à 2,1 ppm peut bien être celui du proton d'un groupe hydroxyle, et celui à 1,2 ppm correspond bien à des protons sur une chaîne carbonée linéaire.

32. ★ Réaction de Cannizzaro

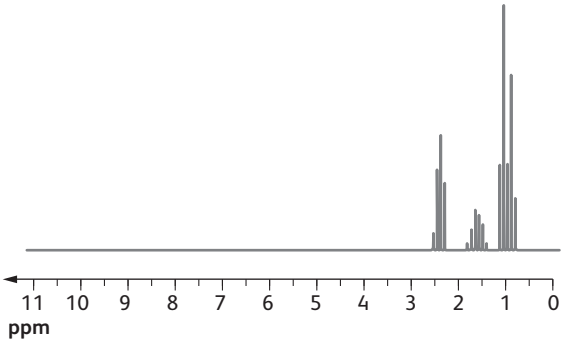
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

a. Les spectres IR peuvent permettre d'identifier des groupes caractéristiques.
b. La bande vers 3 200 cm^{-1} est caractéristique de la liaison O–H, et le spectre IR du produit A_1 ne présente pas d'autre bande caractéristique (au-dessus de 1500 cm^{-1}). Le groupe hydroxyle est donc vraisemblablement présent dans le produit A_1.
c. $C_6H_5-CH_2-OH$ (le cycle aromatique n'est pas modifié).
d. Le spectre IR de A_2 présente une bande vers 3000 cm^{-1} (liaison OH) et une bande vers 1700 cm^{-1} (C=O). La molécule A_2 est donc l'acide benzoïque $C_6H_5-C(=O)-OH$.
e. Le spectre RMN de A_2 présente un massif autour de 8 ppm, correspondant aux protons du cycle aromatique. Le singulet à 12 ppm correspond au proton du groupe carboxyle –COOH.
Le massif à 7,2 ppm dans le spectre de A_1 correspond aux protons du cycle aromatique. Le singulet à 2,5 ppm (1 proton) correspond au proton du groupe hydroxyle, et le singulet vers 4,5 ppm (2 protons) correspond aux protons du groupe $-CH_2-$.
f. $2\ C_6H_5-C(=O)-H + H_2O \rightarrow C_6H_5-CH_2-OH + C_6H_5-C(=O)-OH$.
g. $H-(C=O)-(C=O)-H + H_2O \rightarrow HO-(O=)C-CH_2-OH$.

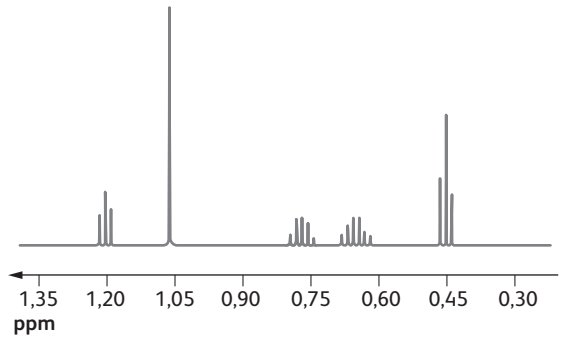
33. ★ Quand la spectroscopie IR ne suffit pas

> COMPÉTENCES : **Réaliser, analyser.**

a. Hexan-2-one : $CH_3-(C=O)-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$
Hexan-3-one : $CH_3-CH_2-(C=O)-CH_2-CH_2-CH_3$
b. Les deux spectres IR montrent une bande vers 3 000 cm^{-1}, caractéristique des liaisons C–H impliquant des atomes de carbone tétraédriques, et une bande à 1 750 cm^{-1}, caractéristique de la liaison C=O.
Seule la zone du spectre correspondant à un nombre d'onde inférieur à 1500 cm^{-1} (c'est-à-dire l'empreinte digitale de la molécule) diffère légèrement, mais sans indication complémentaire (tables de spectres), on ne peut attribuer l'un ou l'autre des deux spectres IR à l'hexan-2-one ou à l'hexan-3-one.
c. Les groupes de protons équivalents n'ont pas le même nombre de protons voisins dans l'hexan-2-one et dans l'hexan-3-one, à cause de la position différente du groupe carbonyle dans les deux molécules.
Dans l'hexan-3-one, on observe 5 groupes de protons équivalents, et chacun des protons a plusieurs protons voisins : tous les signaux seront donc des multiplets.
Dans l'hexan-2-one, il y a aussi 5 groupes de protons équivalents, mais l'un des groupes de protons (sur l'atome de carbone n°1 de la chaîne) n'a pas de protons voisins : son signal sera donc un singulet. Les autres signaux seront des multiplets.
d. Spectre de RMN du proton de l'hexan-3-one :



Spectre de RMN du proton de l'hexan-2-one :



e. On observe bien un singulet dans le spectre de l'hexan-2-one alors que le spectre de l'hexan-3-one ne comporte que des multiplets. On peut donc aisément attribuer l'un des deux spectres de RMN à l'hexan-2-one, et l'autre à l'hexan-3-one.
On remarque que le spectre de RMN de l'hexan-3-one ne fait pas apparaître distinctement 5 signaux : en effet, même si l'on compte 5 groupes de protons équivalents, des protons non équivalents ont des environnements chimiques très similaires, et donc des déplacements chimiques très voisins.

34. ★ In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, analyser.**

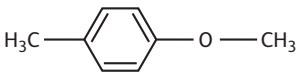
a. Le deutérium est un isotope de l'hydrogène : un noyau de deutérium comporte un proton et un neutron ($A = 2$; $Z = 1$). Son symbole usuel est D.
b. Si les molécules étudiées en RMN étaient dissoutes dans un solvant comportant des noyaux d'atomes d'hydrogène, le signal dû à ces protons sur le spectre serait beaucoup plus intense que les signaux dus aux protons de la molécule (les protons du solvant sont en effet beaucoup plus nombreux que ceux de l'espèce dissoute dans le solvant). Le signal des protons du solvant risquerait donc de masquer ceux des protons de la molécule étudiée.

c. La valeur du déplacement chimique du noyau de deutérium est très différente de celle des protons : le signal à 7,24 ppm n'est donc pas dû au noyau de deutérium du chloroforme deutéré, mais aux protons résiduels du solvant (parmi un grand nombre de molécules de $CDCl_3$, il peut subsister quelques molécules de $CHCl_3$).
d. Les solvants deutérés sont difficiles à fabriquer et très chers, on en introduit donc le moins possible dans les tubes de RMN.

35. ★ Sésamol et méthylanisole

> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider, communiquer.**

a. Points communs : les deux spectres font apparaître deux singulets et un multiplet, le multiplet se situant vers 6,5 ou 7 ppm.
Différence : la courbe d'intégration fait apparaître des sauts qui n'ont pas les mêmes hauteurs relatives : dans le spectre du sésamol, tous les sauts ont des hauteurs différentes, alors que dans celui de la méthylanisole, deux sauts ont même hauteur ; les déplacements chimiques des singulets sont différents dans les deux spectres.

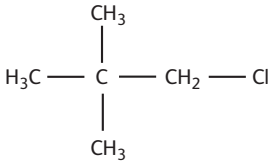


Cette formule comporte deux groupes méthyle CH_3-, comportant chacun trois protons équivalents entre eux. La courbe d'intégration du spectre de RMN de cette molécule présentera donc deux sauts de même hauteur : il s'agit donc de la méthylanisole, et l'autre molécule est donc le sésamol.
Spectre de la méthylanisole : les protons du groupe méthyle lié à l'atome d'oxygène ont un déplacement chimique plus grand (3,8 ppm) que les protons de l'autre groupe méthyle (2,2 ppm).
Les quatre protons liés au cycle benzénique donnent un multiplet vers 7 ppm.
Spectre du sésamol :
Les trois protons liés au cycle benzénique donnent un multiplet vers 6,5 ppm.
Le singulet vers 5,9 ppm correspond à un saut deux fois plus grand que celui du singulet à 5,1 ppm. Donc 5,9 ppm correspond aux deux protons de $-CH_2-$ et 5,1 ppm au proton du groupe hydroxyle.
b. La spectroscopie IR aurait permis de différencier les deux molécules : on aurait vu dans le spectre IR du sésamol la bande caractéristique de la liaison O–H.

36. ★★ Halogénoalcanes

> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider, communiquer.**

a. Le spectre RMN du proton d'un halogénoalcane *A* de formule brute $C_4H_8Br_2$ présente deux signaux, à 1,8 et 3,8 ppm. La courbe d'intégration présente un palier de 3 cm pour le signal à 1,8 ppm, et un palier de 1 cm pour l'autre signal.
Il y a deux types de protons, et trois fois plus d'un des types de protons que de l'autre. Sur 8 protons, 6 correspondent donc au saut de 3 cm (à 1,8 ppm), et 2 correspondent au saut de 1 cm (à 3,8 ppm).
La formule de la molécule est donc :
$CH_3-CHBr-CHBr-CH_3$.
Le spectre RMN du proton d'un halogénoalcane *B* de formule brute $C_5H_{11}Cl$ présente deux signaux, à 1,1 et 3,3 ppm. La courbe d'intégration présente un palier de 1 cm pour le signal à 3,3 ppm, et un palier de 4,5 cm pour l'autre signal.
D'après la courbe d'intégration, il y a 4,5 fois plus de protons à 1,1 ppm que de protons à 3,3 ppm. Le signal à 1,1 ppm correspond à 9 protons, et celui à 3,3 ppm à 2 protons.
La formule de B est :



b. Spectre *A* : Les deux protons des $-CHBr-$ sont bien plus proches de l'atome le plus électronégatif de la molécule (brome) que les 6 autres : ils sont donc à 3,8 ppm, tandis que les 6 protons des deux groupes CH_3- sont à 1,8 ppm.
Spectre *B* : Les deux protons de $-CH_2-$ (3,3 ppm) sont plus proches de l'atome de chlore (électronégatif) que les autres protons (1,1 ppm).
c. Spectre *A* : les deux protons $-CHBr-CHBr-$ sont voisins mais non couplés (car équivalents) ; à 3,8 ppm, on attend un quadruplet (chacun des deux protons a trois protons voisins, ceux d'un CH_3-), et à 1,8 ppm, on attend un doublet (protons ayant un seul proton voisin, celui de $-CHBr-$)
Spectre *B* : aucun proton n'a de proton voisin, donc les deux signaux sont des singulets.

37. ★★ RMN en champ terrestre

> COMPÉTENCES : **S'approprier, communiquer.**

a. Caractère portable et peu onéreux des instruments utilisant la RMN en champ terrestre, pratiques pour être utilisés sur le terrain pour utilisation sur le terrain. Mais les signaux détectés sont faibles, donc nécessité d'un capteur adapté.
b. Acronyme anglais EFNMR : Earth Field Nuclear Magnetic Resonance.
c. Exemples d'applications : travaux à des fins archéologiques (fouilles sous-marines par exemple) ou à des fins scientifiques (étude de la glace en Antarctique).
d. Le champ magnétique.

38. ★★ S'auto-évaluer

a. Les spectres de *A* et de *B* sont différents : les produits de réaction *A* et *B* sont donc différents. Ce sont deux isomères de même formule brute C_3H_7Br : le 1-bromopropane et le 2-bromopropane, de formules semi-développées respectives $CH_2Br-CH_2-CH_3$ et $CH_3-CHBr-CH_3$.
b. Le spectre de la molécule *A* fait apparaître deux signaux : un septuplet et un doublet.

C'est le 2-bromopropane qui comporte deux groupes de protons équivalents :
– les 6 protons des deux groupes méthyle CH_3-, ayant un unique proton voisin (du groupe $-CHBr-$) ; le signal correspondant est donc un doublet.
– le proton du groupe $-CHBr-$ a 6 protons voisins équivalents entre eux, son signal est donc un septuplet. Ce signal est à un déplacement chimique plus élevé (vers 4 ppm) que le doublet, car le proton de – CHBr – est plus proche de l'atome de brome (électronégatif) que les 6 autres protons.
Le spectre de la molécule *B* est celui du 1-bromopropane $CH_2Br-CH_2-CH_3$ (3 groupes de protons équivalents).
On observe deux triplets (les protons de CH_2Br- et ceux de CH_3- ont comme voisins les deux protons du $-CH_2-$).
Le triplet à 3,6 ppm correspond aux protons de CH_2Br, plus proches de l'atome de brome que ceux de CH_3- (triplet vers 1 ppm).
Les protons de $-CH_2-$ donnent lieu à un multiplet plus complexe (vers 1,7 ppm), car ils ont comme voisins deux types de protons différents.

39. ★★ Courses aux hauts champs

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a. Travailler à haut champ pour l'étude des protéines améliore la résolution des spectres : « on augmente la largeur de raie » (cf. Rapport du Sénat du document 2).
b. La phrase soulignée est fausse : on voit que les spectres *A* et *B* font apparaître des signaux ayant les mêmes valeurs de déplacements chimiques. (voir activité 1).
c. Travailler à haut champ pour l'étude des protéines améliore la résolution des spectres et permet donc de mieux voir la structure fine des signaux (cf. Rapport du Sénat du document 2). Cette amélioration de la qualité des spectres avec un champ magnétique plus intense est illustrée par le document 1. Le spectre *B* a été obtenu avec un spectromètre créant un champ magnétique plus grand que le spectre *A* : sa résolution est meilleure, le triplet et le quadruplet sont bien identifiables, ce qui n'est pas le cas sur le spectre *A*.
Le document 3 apporte une information complémentaire sur l'intérêt d'utiliser un champ magnétique le plus intense possible : on peut ainsi diminuer, voire éviter des superpositions entre les signaux de différents protons (dans une « grosse » molécule comme une protéine) qui auraient des déplacements chimiques voisins. C'est ce qui apparaît sur le spectre d'une protéine : l'ensemble des nombreux signaux forme une continuité.
« Le *"prix à payer"* dans cette évolution vers des champs d'intensité plus élevée, c'est la qualité de ceux-ci. Il ne sert en effet à rien d'augmenter le champ magnétique si l'on perd de son homogénéité. » (Rapport du Sénat).
Il existe des spectroscopies de RMN dites à 2 dimensions, et même à 3 dimensions, plus adaptées à l'étude des protéines, et qui permettent de mettre en évidence des interactions entre des noyaux différents (et des espèces différentes) (cf. document 2 et l'exemple de spectre de RMN 2D).

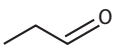
EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

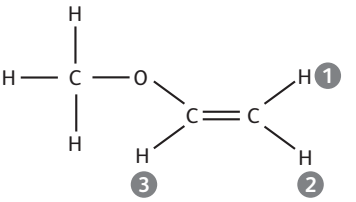
40. DÉPARTAGER DES ISOMÈRES PAR SPECTROSCOPIE

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, valider.**

1. Les deux formules topologiques données correspondent à la même formule brute : C_3H_6O. Les deux molécules *A* et *B* sont donc bien isomères.
2. Le propanal est un aldéhyde dont la chaîne carbonée est constituée d'un enchaînement de trois atomes de carbone. La formule semi-développée du propanal est donc $CH_3-CH_2-CH=O$, soit, en formule topologique :



3. Le propanal contient trois groupes de protons équivalents : l'un formé par les trois protons du groupe méthyle CH_3-, un autre formé par les deux protons de $-CH_2-$, et un autre formé par le proton lié à l'atome de carbone du groupe carbonyle.



Les trois protons du groupe méthyle sont équivalents du fait de la libre rotation autour de la liaison simple C–O. Les protons 1 et 2 ne sont pas équivalents du fait de l'impossibilité de la rotation autour de la double liaison C=C : le proton 1 est donc spatialement plus proche de l'atome d'oxygène de la molécule que le proton 2.
Le spectre de RMN de la molécule *A* fait apparaître trois signaux : la molécule *A* comporte donc trois groupes de protons équivalents.
Le spectre de RMN de la molécule *B* fait apparaître quatre signaux : la molécule *B* comporte donc quatre groupes de protons équivalents.
L'isomère *A* est donc le propanal $CH_3-CH_2-CH=O$, tandis que la formule semi-développée de l'isomère *B* est : $CH_3-O-CH=CH_2$.
4. a. Dans le propanal (isomère *A*), tous les protons ont des protons voisins : les 3 protons du méthyle $-CH_3$ ont 2 protons voisins (ceux de $-CH_2-$) et donnent donc un triplet ; le proton lié à l'atome de carbone du groupe carbonyle a aussi 2 protons voisins (ceux de $-CH_2-$) et donne donc un triplet. Enfin, les protons de $-CH_2-$ ont deux types de voisins : les 3 protons du groupe méthyle et le proton lié à l'atome de carbone du carbonyle ; on observe un massif.
Tous les signaux du spectre de RMN de *A* sont donc bien des multiplets.

Dans la molécule *B*, les trois protons du groupe méthyle n'ont pas de protons voisins et donnent donc un singulet, bien visible sur le spectre (vers 3,2 ppm).

b. Le signal à 9,8 ppm dans le spectre de RMN de *A* correspond à un atome d'hydrogène lié à l'atome de carbone d'un groupe carbonyle. Ce signal permet immédiatement de conclure que *A* est le propanal.

5. Dans le spectre IR, on observe une bande fine et intense vers 1 750 cm^{-1}, caractéristique d'une double liaison C=O. Ce spectre IR correspond donc au propanal : *A*. La spectroscopie IR est donc tout aussi efficace que la spectroscopie de RMN du proton pour distinguer les deux isomères étudiés ici.

41. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

La règle des (n + 1)-uplets

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

Analyse du document 3

On voit qu'il y a quatre situations différentes, mais seulement trois bilans différents.

Pour les noyaux d'atomes d'hydrogène H_c, trois fréquences de résonance, et donc trois valeurs de déplacement chimique peuvent être mesurées, l'une de ces trois valeurs étant deux fois plus probable que les autres. Cette modélisation donne un résultat cohérent avec le spectre expérimental : le signal des protons H_c est bien un triplet, et le saut de la courbe d'intégration pour le pic central est bien deux fois plus haut que les deux autres.

Remplissons un tableau analogue à celui du document 3, mais pour un proton ayant trois protons voisins. C'est le cas des atomes d'hydrogène H_b.

1er noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène H_b	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓
2e noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène H_b	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↓
3e noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène H_b	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Bilan	↑↑↑	↑↑↓	↑↓↑	↑↓↓	↓↑↑	↓↑↓	↓↓↑	↓↓↓

Dans ce cas, huit situations différentes sont possibles, mais il y a seulement quatre bilans différents.

On doit donc observer quatre fréquences de résonance, et donc quatre valeurs de déplacement chimique différentes, les deux valeurs intermédiaires étant trois fois plus probables que les deux valeurs extrêmes : on observe bien un quadruplet, et le saut de la courbe d'intégration correspondant à chacun des deux pics centraux est bien trois fois plus grand que celui de chacun des deux pics extrêmes.

Analyse du document 4

Si les protons H_e et H_f sont des environnements chimiquement semblables, on peut considérer qu'ils jouent le rôle de petits champs magnétiques de même intensité, et la modélisation du document 2 reste valable : on observera un triplet. La règle des (n + 1)-uplets s'applique.

Pour modéliser le fait que le proton H_e et le proton H_f sont dans des environnements chimiques différents, on va choisir deux flèches de longueurs différentes.

noyau d'atome d'hydrogène H_e	↑	↑	↓	↓
noyau d'atome d'hydrogène H_f	↓	↑	↑	↓
Bilan	↑↓	↑↑	↑↓	↓↓

Ici, on a quatre situations différentes équiprobables, donc quatre valeurs de déplacement chimique. Le signal comportera donc quatre pics de hauteurs voisines (le saut de la courbe d'intégration sera le même pour chaque pic). On ne peut le qualifier de quadruplet.

Cas du propan-1-ol

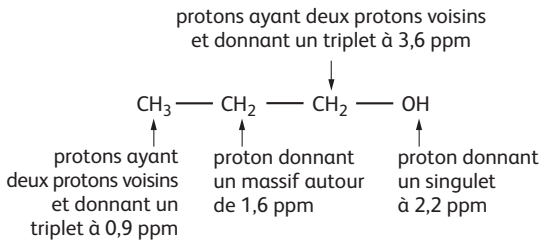
La formule semi-développée du propan-1-ol est : $CH_3-CH_2-CH_2-OH$.

Le seul proton qui n'a pas de protons voisins est celui du groupe hydroxyle : le signal correspondant est le singulet à 2,2 ppm.

Les trois protons du groupe méthyle CH_3- ont deux protons voisins : ces trois protons donnent donc un triplet. Le saut de la courbe d'intégration correspondant à ces trois protons doit être trois fois plus grand que celui correspondant au signal du proton du groupe hydroxyle : c'est donc, d'après la courbe d'intégration, le triplet à 0,9 ppm qui correspond aux trois protons du groupe méthyle.

L'autre triplet, à 3,6 ppm, correspond aux deux protons liés à l'atome de carbone lié au groupe hydroxyle : ces protons sont couplés à deux autres protons. Le saut de la courbe d'intégration correspondant au signal de ces deux protons, à 3,6 ppm est bien deux fois plus grand que le saut correspondant au proton du groupe hydroxyle à 2,2 ppm.

On en déduit l'attribution du quatrième signal, qui correspond aux protons situés sur l'atome de carbone central de la chaîne carbonée.



Les protons situés sur l'atome de carbone central de la chaîne carbonée (et donnant le massif autour de 1,6 ppm) ont au total cinq protons voisins, avec deux types de protons voisins différents : ceux du groupe méthyle et ceux du $-CH_2-$ voisin (donnant le triplet à 3,6 ppm).

Si l'on considère qu'on est dans le cas où les deux types de protons voisins sont dans des environnements chimiques semblables, on s'attend à observer un sextuplet (règle des (n + 1)-uplets).

Or ici le massif est plus complexe qu'un sextuplet, cette modélisation ne convient donc pas.
En effet, si l'on observe la molécule, on voit bien que les deux types de protons voisins n'ont pas le même environnement chimique, ceux donnant le triplet à 3,6 ppm étant beaucoup plus proches d'un atome électronégatif – celui d'oxygène – que ceux donnant le triplet à 0,9 ppm.
Pour modéliser cette situation, on s'intéresse d'abord au couplage avec les deux protons donnant le triplet à 3,6 ppm. On obtient 3 valeurs de champ magnétique résultant, l'une étant deux fois plus probable que les deux autres (cf. document 3).
À chacune de ces résultantes on peut associer une autre valeur de champ magnétique, due au couplage avec les 3 protons donnant le triplet à 0,9 ppm. : il y a à chaque fois 4 valeurs possibles (les deux valeurs intermédiaires étant trois fois plus probables que les extrêmes). Le massif présente $3 \times 4 = 12$ pics. C'est ce qu'on observerait si les valeurs du champ magnétique correspondant aux deux groupes de protons étaient plus éloignées.
On est donc dans une situation intermédiaire entre le sextuplet et le signal à 12 pics.

42. LA SPECTROSCOPIE PAR RÉSONNANCE MAGNÉTIQUE

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

1. a. Spectre de RMN du proton de la choline

La choline comporte quatre groupes de protons équivalents. Cependant, on repère seulement trois signaux sur son spectre de RMN. Il est probable que le signal du proton du groupe hydroxyle (souvent aplati et peu intense) n'apparaisse pas sur ce spectre.
Les 9 protons appartenant aux trois groupes méthyle $-CH_3$ sont équivalents et donnent le signal à 3,2 ppm : c'est en effet ce signal qui correspond au plus grand nombre de protons d'après la courbe d'intégration.
Le saut à 3,2 ppm est environ 4,5 fois plus grand que chacun des deux autres sauts de la courbe d'intégration, à 3,5 ppm et 4,0 ppm.
Chacun des signaux à 3,5 ppm et 4,0 ppm correspondent donc à 4,5 fois moins de protons que le signal à 3,2 ppm (9 protons) : chacun des signaux à 3,5 et 4,0 ppm correspond donc aux deux protons de l'un des deux groupes $-CH_2-$ de la choline, mais il est difficile de les attribuer plus précisément.

Spectre de RMN du proton du lactate

Le spectre fait apparaître deux signaux : un doublet à 1,3 ppm, et un quadruplet à 4,2 ppm. D'après la courbe d'intégration, le signal à 1,3 ppm correspond à trois fois plus de protons que le signal à 4,2 ppm.
Or, sur la formule semi-développée du lactate, il apparaît trois groupes de protons équivalents : les trois protons (a) du groupe méthyle, le proton (b) lié au carbone central de la chaîne carbonée (à trois atomes de carbone) et le proton (c) lié au groupe hydroxyle. Les protons (a) et (b) sont voisins : les protons (a) apparaissent sous la forme d'un doublet (ils sont voisin du proton (b)) et le proton (b) apparaît sous forme d'un quadruplet (il a pour voisins les trois protons (a)).
Comme dans le spectre de la choline, le proton du groupe hydroxyle n'apparaît pas sur ce spectre.
On remarque aussi que les protons (a) ont un déplacement chimique bien inférieur à celui du proton (b), plus proche des atomes électronégatifs (d'oxygène) de la molécule.

Spectre de RMN de la créatine

D'après la courbe d'intégration, le signal à 3,0 ppm correspond donc à 1,5 fois plus de protons que le signal à 4,0 ppm.
On en déduit que sur ce spectre, les protons directement liés à un atome d'azote n'apparaissent pas. Le signal à 3,0 ppm (singulet) correspond aux trois protons du groupe méthyle, et le signal à 4,0 ppm correspond aux deux protons du groupe $-CH_2-$.

b. La plupart des atomes d'hydrogène du cholestérol sont sur une chaîne carbonée analogue à celle d'un alcane, et éloignés d'atomes électronégatifs. La table simplifiée de valeurs de déplacement chimique indique l'intervalle [0,8 ppm – 2,5 ppm] pour ce type de protons, et on observe effectivement que la majorité des signaux du cholestérol appartient à cet intervalle.
On repère également un autre signal ayant un déplacement chimique caractéristique : le triplet à 5,2 ppm correspond à un proton lié à une double liaison C=C. Et dans, le cholestérol, il y a effectivement un (et un seul) atome d'hydrogène lié à la double liaison C=C (et cet atome d'hydrogène a bien deux atomes d'hydrogène voisins).

2. a. Sur le spectre du cerveau sain obtenu par SRM, chacune des espèces étudiées est repérée par un seul signal.

b. Spectre de la choline

Il fait apparaître trois signaux, mais l'un des trois correspond à beaucoup plus de protons que les autres (cf. courbe d'intégration) : le signal correspondant est donc beaucoup plus grand que les deux autres, et c'est lui qui est repéré sur un spectre du cerveau (à 3,2 ppm).

Spectre du lactate

C'est là encore le signal le plus grand (1,3 ppm) qui est repéré sur le spectre du cerveau.

Spectre de la créatine

C'est le signal le plus grand (à 3,0 ppm) qui est étudié dans le spectre du cerveau. Néanmoins, on peut aussi repérer le signal à 4,0 ppm, mais les médecins ne n'y intéressent pas.

c. Les lipides sont repérés par un massif vers 1,3 ppm. Le cholestérol présente bien un massif important autour de ce déplacement chimique, et c'est vraisemblablement le cas pour d'autres lipides.

d. Dans le spectre SRM du cerveau sain comme dans celui du cerveau atteint d'une tumeur, on observe un signal pour la créatine (3,0 ppm) et un signal pour la choline (3,2 ppm).

Dans le cerveau sain, le signal de la créatine est légèrement plus grand que celui de la choline, alors que dans le cerveau atteint, le signal de la choline est beaucoup plus grand. Or, d'après le document, la créatine sert de référence, sa concentration variant peu lors d'une pathologie, alors que la présence de la choline en concentration supérieure à la normale peut traduire « la prolifération de cellules membranaires dans le cas d'une tumeur ».
Cette comparaison des deux spectres confirme donc le diagnostic médical de suspicion de processus tumoral dans le cas du spectre du document 3.

e. La SRM est une technique non invasive (pas de prélèvement) et non douloureuse, contrairement à la biopsie. Elle ne nécessite pas d'anesthésie.
Par rapport à l'IRM, la SRM peut apporter des informations complémentaires ; si une tumeur a été détectée par IRM, la SRM peut permettre d'avoir des précisions sur la nature de cette tumeur.

CHAPITRE

7

COMPRENDRE

Principe d'inertie et quantité de mouvement

> Manuel pages 148 à 169

Choix pédagogiques

La loi de conservation de la quantité de mouvement contenant le principe d'inertie dans le cas d'un système isolé de masse constante, le choix a été fait de regrouper leur étude dans un même chapitre.
Une première partie traite uniquement de cinématique ; la mesure du temps est abordée sans développement et le vecteur vitesse est introduit. Le vecteur accélération sera défini dans le chapitre 8.
La deuxième partie introduit le système matériel et les actions mécaniques. Le principe d'inertie est tout d'abord donné tel qu'il est énoncé en classe de seconde avant d'être complété par les notions de référentiel galiléen et de centre d'inertie. L'énoncé qui est alors donné introduit le terme « système isolé » qui sera repris dans la troisième partie.
Le vecteur quantité de mouvement et la loi de conservation constituent cette troisième partie.
Des animations, des simulations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Le projet *Breakthrough Starshot*

Quel est l'intérêt d'envoyer des sondes spatiales d'un gramme dans l'espace ?

Les illustrations et la photographie de la page d'ouverture illustrent *Breakthrough Starshot*, le projet futuriste d'exploration d'Alpha du Centaure qui est le système stellaire le plus proche du système solaire.
Le projet, soutenu par plusieurs scientifiques de renom (Hawking, Freeman Dyson, etc.), lancé début 2016, prévoit « d'envoyer dans l'espace, à l'aide d'un faisceau laser de forte puissance, des milliers de sondes spatiales d'environ un gramme, équipées de voiles solaires ».
Le choix de présenter quelques images de ce projet a été fait pour que les élèves réfléchissent au changement radical de la technique envisagée pour l'exploration spatiale à très longue portée qui peut se résumer par la question : « Quel est l'intérêt d'envoyer des sondes spatiales d'un gramme dans l'espace ? »
Les élèves connaissent déjà l'expression de l'énergie cinétique et ils pourront émettre l'hypothèse que, pour une même énergie cinétique communiquée à la sonde, si on diminue sa masse d'un facteur un million, on augmente alors sa vitesse d'un facteur mille. Ce qui permet alors de parcourir des distances mille fois plus grandes que celles parcourues par les sondes actuelles. Une fois cette vitesse atteinte, la sonde persévère dans son mouvement quasi rectiligne et uniforme car elle constitue un système quasiment isolé dans l'espace intersidéral (les forces de gravitation sont faibles à plusieurs millions de km des astres) : nul besoin de moteur pour continuer le voyage ! Ce changement d'échelle des distances parcourues pendant un temps donné ouvre alors la voie à l'exploration interstellaire.
La question de la technologie envisagée, avec l'utilisation d'un laser de très forte puissance bombardant de photons une voile solaire pour la faire avancer, pourra alors surgir. Comment un flux de particules immatérielles peut-il mettre en mouvement la voile solaire (et la sonde) ? La réponse peut être faite en introduisant une nouvelle grandeur transportée par le photon : la quantité de mouvement. On pourra alors expliquer rapidement l'idée du principe de la propulsion de la voile solaire (et de la sonde) en terme de conservation de la quantité de mouvement du système photons-voile. On n'entrera pas dans les détails de l'expression de la quantité de mouvement du photon, définition qui sera abordée dans le chapitre 19.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Mesurer le temps

Commentaires

Cette première activité est une introduction à la mesure du temps ; l'évolution de la définition de la seconde est étudiée en s'appuyant sur l'évolution des horloges de l'antiquité à nos jours.
Les différents phénomènes périodiques utilisés sont abordés ainsi que la recherche de la stabilité et de l'universalité d'un étalon de temps.
La précision des différentes horloges, le fonctionnement et les avantages de l'horloge atomique sur les autres dispositifs de mesure du temps seront développées dans le chapitre 10 « Oscillateurs et mesure du temps ».

Réponses

S'APPROPRIER

1. La définition actuelle utilise une référence atomique basée sur une transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium 133.
Les définitions précédentes utilisaient une référence astronomique, la durée de rotation de la Terre autour de son axe puis la durée de révolution de la Terre autour du Soleil.

ANALYSER

2. a. À son époque, Galilée ne disposait pas d'horloges mécaniques.
Ne disposant pas de chronomètre, l'étalon de temps que constitue la durée d'un battement du cœur pouvait lui permettre d'évaluer puis de comparer des durées (durées des oscillations d'un pendule par exemple)
Pour étudier la chute des corps, il utilisa des clepsydres (pesée de l'eau écoulée pendant la durée de chute).
b. Les horloges citées sont : le gnomon, le cadran solaire, la clepsydre, le sablier, l'horloge mécanique, l'horloge à quartz, l'horloge atomique.
Le gnomon comme le cadran solaire, utilisent l'ombre portée d'un objet sur un cadran. Le phénomène périodique est le mouvement apparent de rotation du Soleil dans le ciel dont la période est de 24 h.
L'oscillateur d'une horloge mécanique a une période de l'ordre de la seconde.
La fréquence de l'oscillateur d'une horloge à quartz est de 32 768 Hz soit une période de l'ordre de 10^{-5} s.
La fréquence de l'oscillateur d'une horloge atomique est de 9 192 631 770 Hz soit une période de l'ordre de 10^{-10} s.

VALIDER

3. La première définition (la durée de rotation de la Terre autour de son axe) a été mise en défaut avec l'apparition de l'horloge à quartz qui a montré que la durée de rotation de la Terre varie de quelques millièmes de secondes par jour.
La deuxième définition (la durée de révolution de la Terre autour du Soleil) a été mise en défaut avec la réalisation des horloges atomiques dont la précision a permis de montrer que la durée de révolution de la Terre autour du Soleil varie également.
La recherche d'une meilleure stabilité de la référence temporelle a conduit à la définition actuelle basée sur une transition atomique.

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Référentiels et principe d'inertie

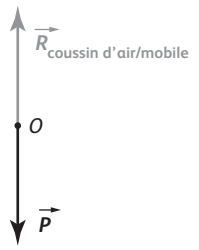
Commentaires

L'activité s'appuie sur une expérience simple de déplacement d'un mobile autoporté sur une table horizontale ; son exploitation va permettre de préciser l'énoncé du principe d'inertie et notamment la notion de référentiel galiléen.
L'activité peut être complétée par une détermination de vecteurs vitesse.

Réponses

RÉALISER

1. a. b. L'enregistrement montre que les points A_0, A_1, …A_n sont alignés. Les distances entre deux points consécutifs sont égales : la vitesse du traceur central est constante. Par contre les points B_0, B_1, …B_n ne sont pas alignés. Les distances entre deux points consécutifs ne sont pas égales.
c.
Le mobile est soumis à l'action de la Terre et à l'action du coussin d'air formé entre le mobile et la table.
On peut négliger l'action de l'air ambiant devant les autres actions.
L'action de la Terre est modélisée par le poids $\vec{P}$, vertical et dirigé vers le bas.



L'action du coussin d'air est modélisée par une force $\vec{R}$ telle que $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$. Puisque les forces se compensent, $\vec{R}$ est donc verticale, dirigée vers le haut et de même valeur que $\vec{P}$.

VALIDER

d. Le mouvement du traceur central repéré par les points A_i est rectiligne et s'effectue à vitesse constante alors que le mouvement du traceur périphérique repéré par les points B_i est quelconque. Le traceur central donne le mouvement du centre d'inertie qui se situe sur l'axe de symétrie du mobile ; le mouvement du centre d'inertie est rectiligne et uniforme.

RÉALISER

2. a. L'enregistrement effectué sur la feuille fixe F_1 montre des points alignés et la distance entre deux points consécutifs est constante. On retrouve un enregistrement identique sur la feuille F_2 lorsqu'on lui communique un mouvement de translation à vitesse constante. Ce n'est plus le cas lorsqu'on lui communique un mouvement quelconque : dans ce cas les points ne sont plus alignés et la distance entre deux points consécutifs n'est plus constante.
b. Le mouvement du traceur central (qui montre le mouvement du centre d'inertie du mobile) est rectiligne uniforme sur la feuille F_1. Il peut être quelconque sur la feuille F_2.
c. L'expérience 1 montre que tous les points d'un système isolé (le mobile autoporté) n'ont pas le même mouvement : seul son centre d'inertie est en mouvement rectiligne uniforme.
L'expérience 2 montre que le centre d'inertie d'un système isolé n'est en mouvement uniforme que dans certains référentiels : celui qui est associé à la feuille fixe F_1 ou à la feuille F_2 lorsqu'elle est en mouvement de translation à vitesse constante par rapport à F_1. Ces

référentiels sont qualifiés de galiléens. Le référentiel associé à la feuille F_2 en déplacement quelconque ne constitue pas un référentiel galiléen.
Les résultats expérimentaux sont bien en cohérence avec l'énoncé du principe d'inertie.

3. SIMULATION
La quantité de mouvement et sa conservation

Commentaires
Pour introduire la quantité de mouvement et sa conservation, le choix s'est porté sur une simulation offrant la possibilité de « manipuler » des systèmes isolés.
L'activité ne portant pas sur le principe d'inertie, il n'y a pas de questions relatives à la nature du mouvement des deux objets constituant le système. Il est cependant nécessaire de faire remarquer aux élèves que le système étudié est isolé.
La première partie est limitée à l'étude d'un choc avec accrochage permettant à l'élève de se familiariser avec la notion de système constitué par deux objets.
La deuxième partie offre plus de libertés à l'élève avec la possibilité de réaliser des chocs élastiques.
Dans les fichiers *Interactive Physics* disponibles pour l'activité, la valeur de l'élasticité des objets est nulle pour l'étude des chocs avec accrochage, elle est de un pour l'étude des chocs avec rebonds.

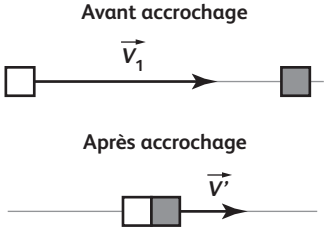
Réponses
RÉALISER
1. a. b. Les masses étant constantes, la valeur v' de la vitesse de l'ensemble des deux cubes augmente lorsque la valeur v_1 de la vitesse du cube A_1 augmente.

	v_1 (m·s^{-1})	v' (m·s^{-1})
m_1 = 50 g ; m_2 = 80 g	4,50	1,73
m_1 = 50 g ; m_2 = 80 g	9,00	3,46

Lorsque la masse m_2 du cube A_2 augmente, les autres paramètres étant constants, la valeur v' diminue :

	m_2 (g)	v' (m·s^{-1})
m_1 = 50 g ; v_1 = 9,00 m·s^{-1}	50	4,50
m_1 = 50 g ; v_1 = 9,00 m·s^{-1}	100	3,00

c.

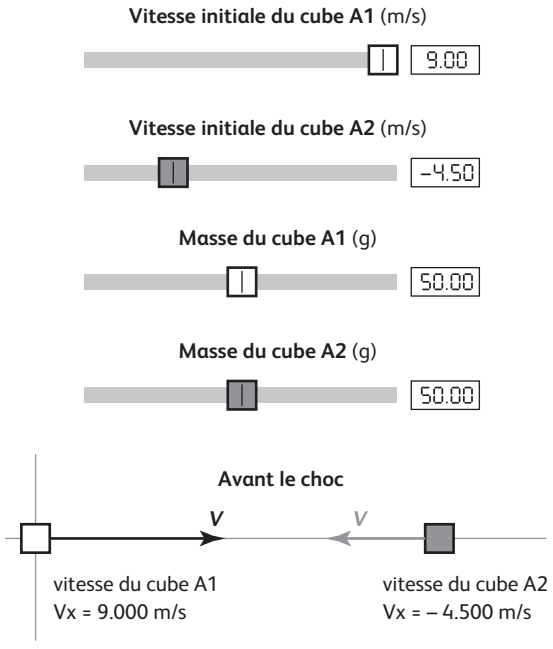


ANALYSER
2. D'après le schéma précédent, on voit que les vitesses $\vec{v}_1$ et $\vec{v}'$ sont colinéaire et de même sens. Donc si les deux grandeurs $m_1\vec{v}_1$ et $(m_1 + m_2)\,\vec{v}'$ sont égales alors on doit avoir également : $m_1 \times v_1 = (m_1 + m_2) \times v'$.
Vérifions le pour les différents cas :

	(kg·m·s^{-1})	(kg·m·s^{-1})
m_1 = 50 g ; m_2 = 80 g ; v_1 = 4,50 m·s^{-1} ; v_2 = 1,73 m·s^{-1}	0,225	0,225 (à 3 C.S.)
m_1 = 50 g ; m_2 = 80 g ; v_1 = 9,00 m·s^{-1} ; v_2 = 3,46 m·s^{-1}	0,450	0,450 (à 3 C.S.)
m_1 = 50 g ; m_2 = 50 g ; v_1 = 9,00 m·s^{-1} ; v_2 = 4,50 m·s^{-1}	0,450	0,450
m_1 = 50 g ; m_2 = 100 g ; v_1 = 9,00 m·s^{-1} ; v_2 = 3,00 m·s^{-1}	0,450	0,450

3. a. Avant l'accrochage : $\vec{p} = m_1\vec{v}_1 + \vec{0}$.
Après le choc avec accrochage : $\vec{p}' = (m_1 + m_2)\,\vec{v}'$.
b. La relation retenue à la question **2.** s'écrit :
$m_1\vec{v}_1 = (m_1 + m_2) \times \vec{v}'$ soit $\vec{p} = \vec{p}'$.
On a donc vérifié à la question **2.** que la quantité de mouvement du système $\{A_1, A_2\}$ constitué par les deux cubes est un vecteur constant.

RÉALISER
4. Exemple de choc avec rebond (l'affichage des vecteurs dans le logiciel *Interactive Physics* est la flèche habituelle, mais la notation des vecteurs vitesse comme $\vec{v}_1$, $\vec{v}_2$, est identique pour tous, c'est V) :
Avant le choc
$p = m_{1x}v_{1x} + m_{2x}v_{2x}$
$= 50{,}0 \times 10^{-3} \times 9{,}00 - 50{,}0 \times 10^{-3} \times 4{,}50$
$= 0{,}225$ kg·m·s^{-1}

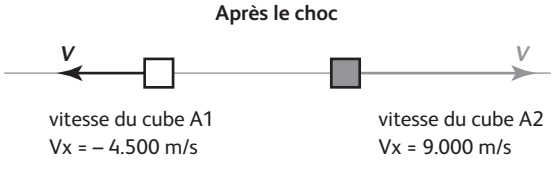


Après le choc

$p' = m_{1x}v_{1x}' + m_{2x}v_{2x}'$

$= -50{,}0 \times 10^{-3} \times 4{,}50 + 50{,}0 \times 10^{-3} \times 9{,}00$

$= 0{,}225$ kg·m·s^{-1}



Les vecteurs $\vec{p}$ et $\vec{p}'$ ayant même direction, même sens et même valeur sont égaux : $\vec{p} = \vec{p}'$.

Le résultat précédent se généralise à toutes les situations :

– avec accrochage :

$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\,\vec{v}'$

$\vec{v}_2$ étant la vitesse du cube A_2 ;

– avec rebond :

$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2'\ \vec{v}'$

$\vec{v}_1'$ étant la vitesse du cube A_1 après le choc, v_2' étant la vitesse du cube A_2 après le choc.

La quantité de mouvement du système $\{A_1, A_2\}$ constitué par les deux cubes est un vecteur constant.

Chaque cube est en mouvement rectiligne uniforme avant et après le choc. D'après le principe d'inertie, la somme des forces qu'ils subissent est nulle. Ils sont dits isolés et le système qu'ils constituent est isolé.

La quantité de mouvement d'un système isolé est un vecteur constant.

4. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
La propulsion par réaction

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017.

EXERCICES Appliquer le cours

Étude cinématique (§1 du cours)

13. Définir et reconnaître des mouvements

a. À $t_0 = 0$ s, $x(t_0) = 1$ et $y(t_0) = 3$.

Le vecteur position est par définition :

$\overrightarrow{OA}(t_0) = x(t_0)\vec{i} + y(t_0)\,\vec{j} = \vec{i} + 3\,\vec{j}$

b. Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :

$$\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{OA}}{dt} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j}$$

$$\text{et } v_x = \frac{dx}{dt} = 5 \text{ m·s}^{-1} ; v_y = \frac{dy}{dt} = 0$$

c. Le vecteur vitesse est un vecteur constant, la trajectoire est une droite et le mouvement est rectiligne uniforme.

14. Calculer et représenter la vitesse

a. Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport au temps.

b. L'expression approchée du vecteur vitesse étant :

$$\vec{v}(t_3) = \frac{\overrightarrow{A_2A_4}}{2\tau}.$$

Le vecteur vitesse à la date t_3 a même direction et même sens que le vecteur $\overrightarrow{A_2A_4}$.

Sa valeur est donnée par : $v_3 = \dfrac{\overrightarrow{A_2A_4}}{2\tau}$.

Pour tout le quadrillage : 13 carreaux représentent 13 cm dans la réalité et mesurent 7,3 cm sur le papier (6,3 cm dans la version format compact du livre), A_2A_4 représentent x cm dans la réalité et mesure 2,6 cm sur le papier (2,2 cm format compact) ; la règle de proportionnalité permet écrire :

$$\frac{x}{13} = \frac{2{,}6}{7{,}3}\left(= \frac{2{,}2}{6{,}3}\right) \rightarrow \frac{13 \times 2{,}6}{7{,}3} = 4{,}6 \text{ cm } \left(= \frac{13 \times 2{,}2}{6{,}3}\right)$$

$$v_3 = \frac{4{,}6 \times 10^{-2}}{2 \times 40 \times 10^{-3}} = 0{,}58 \text{ m·s}^{-1}.$$

Principe d'inertie (§2 du cours)

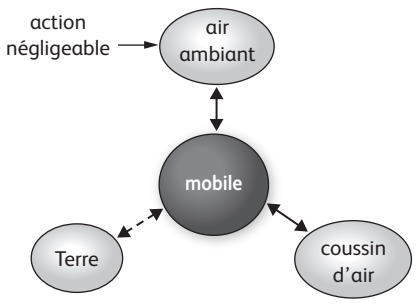
15. Connaître et exploiter le principe d'inertie

a. Le mouvement du centre d'inertie d'un solide est en général plus simple que celui que le mouvement des autres points de ce solide : le tracé *B* correspond donc au centre d'inertie du mobile.

b. Le tracé correspondant au centre d'inertie est formé de points alignés et régulièrement répartis : dans le référentiel du laboratoire considéré comme galiléen, le mouvement du centre d'inertie du mobile est rectiligne et uniforme. D'après le principe d'inertie, le système étudié dans un référentiel considéré comme galiléen est alors un système isolé car si $\overrightarrow{v_G} = \overrightarrow{\text{constante}}$ alors $\sum\overrightarrow{F_{\text{ext}}} = \vec{0}$.

Le mobile est donc un système isolé lors de cette expérience, les forces appliquées au système se compensent.

c. Le mobile autoporteur est en interaction avec la Terre, le coussin d'air et l'air ambiant d'où le diagramme suivant :



L'action due à la Terre est modélisée par le poids $\vec{P}$, l'action du coussin d'air par une force $\vec{R}$. En négligeant l'action de l'air ambiant : $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$ soit $\vec{R} = -\vec{P}$.

Quantité de mouvement (§3 du cours)

16. Définir la quantité de mouvement

a. Le vecteur quantité de mouvement d'un point matériel de masse m et animé d'une vitesse $\vec{v}$ est : $\vec{p} = m\vec{v}$

Le vecteur quantité de mouvement d'un système matériel est égale à la somme des vecteurs quantités de mouvement des n points matériels qui le constituent :

$\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} \vec{p_i}$

b. $p = mv = 1{,}0 \times 10^3 \times \dfrac{120}{3{,}6} = 3{,}3 \times 10^4 \text{ kg·m·s}^{-1}$.

c. On note M, la masse du camion et V, sa vitesse.

$p = mv = MV$; d'où $V = \dfrac{m}{M} v$.

A.N. : $V = \dfrac{1}{30} \times 120 = 4{,}0 \text{ km·h}^{-1}$.

17. Interpréter un mode de propulsion

a. Dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen, on étudie le système constitué par les deux patineurs.

b. Avant qu'ils ne se repoussent, les patineurs sont immobiles, leur quantité de mouvement est nulle. La quantité de mouvement du système est alors nulle : $\vec{p} = \vec{0}$.

Lorsque A et B se sont repoussés, la quantité de mouvement du système est : $\vec{p'} = \vec{p_A} + \vec{p_B}$.

Les frottements étant négligeables, chaque patineur est soumis à deux forces qui se compensent, son poids et la réaction du sol : le système étudié est isolé.

Dans ce cas, il y a conservation de la quantité de mouvement : $\vec{p} = \vec{p'}$ soit $\vec{0} = \vec{p_A} + \vec{p_B}$.

Les vecteurs quantité de mouvement de A et de B sont opposés : $\vec{p_A} = -\vec{p_B}$.

c. L'égalité précédente se traduit par :

$m_A \vec{v_A}(t) = -m_B \vec{v_B}(t)$

soit $\vec{v_B}(t) = -\dfrac{m_A}{m_B} \vec{v_A}(t)$.

Les vecteurs vitesse ont même direction mais des sens opposés.

Si $v_A = 4{,}0 \text{ m·s}^{-1}$:

$v_B = \dfrac{m_A}{m_B} v_A = \dfrac{50}{80} \times 4{,}0 = 2{,}5 \text{ m·s}^{-1}$.

18. Utiliser la conservation de la quantité de mouvement

a. On note $\vec{p}_{\text{avant}}$ la quantité de mouvement du système avant l'accrochage et $\vec{p}_{\text{après}}$, la quantité de mouvement du système après l'accrochage. Le système constitué par le wagon et la motrice est supposé isolé car les frottements sont négligeables :

$\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$

$p_{\text{avant}} = p_{\text{après}} = m_1 v_1 + m_2 v_2$

$p_{\text{avant}} = 100 \times 10^3 \times \dfrac{4{,}0}{3{,}6} = 1{,}1 \times 10^5 \text{ kg·m·s}^{-1}$.

b. Après l'accrochage, la vitesse du convoi étant noté v' :

$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$

d'où $v' = \dfrac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \dfrac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}$ avec $v_2 = 0$.

A.N. : $v' = \dfrac{100 \times 10^3 \times 4{,}0}{(100 \times 10^3 + 20 \times 10^3)} = 3{,}3 \text{ km·h}^{-1}$.

c. Cas 2 : $v' = \dfrac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$ avec $v_2 = 2{,}0 \text{ km·h}^{-1}$.

A.N. : $v' = 3{,}7 \text{ km·h}^{-1}$.

Cas 3 : le wagon se déplace en sens inverse de la motrice, la coordonnée de sa quantité de mouvement sur un axe orienté dans le sens du mouvement de la motrice sera $-m_2 v_2$. Ainsi :

$v' = \dfrac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}$ avec $v_2 = 2{,}0 = \text{km·h}^{-1}$.

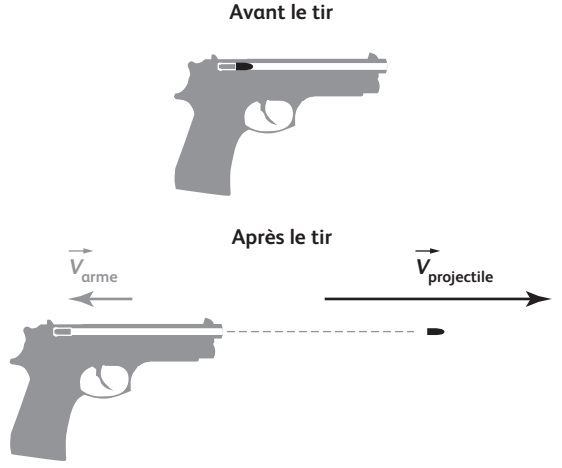
A.N. : $v' = 3{,}0 \text{ km·h}^{-1}$.

EXERCICES S'entraîner

19. Exercice résolu dans le manuel

20. Application de l'exercice résolu

Schéma de la situation :



• Avant le tir, le système {arme à feu + projectile} est au repos dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen : c'est un système isolé.

Juste après le tir on considère que le système est encore isolé, il y a donc conservation de la quantité de mouvement ce qui implique que la somme des quantités de mouvement de l'arme à feu et du projectile soit encore nulle. Dans ces conditions les vitesses du projectile et de l'arme sont obligatoirement de sens opposés et de même direction : le projectile part vers « l'avant » et l'arme part vers « l'arrière » dans le référentiel terrestre. Le projectile « avance » et l'arme « recule ».

• La conservation de la quantité de mouvement se traduit donc par :

$\vec{p}_{\text{avant le tir}} = \vec{p}_{\text{après le tir}}$

soit $\vec{0} = m_{\text{arme}} \vec{v}_{\text{arme}} + m_{\text{projectile}} \vec{v}_{\text{projectile}}$

ou encore $-m_{\text{arme}} \vec{v}_{\text{arme}} = m_{\text{projectile}} \vec{v}_{\text{projectile}}$

En projetant sur l'axe du mouvement du projectile :

$$m_{\text{arme}}\, v_{\text{arme}} = m_{\text{projectile}}\, v_{\text{projectile}}$$

$$\text{d'où } v_{\text{arme}} = \frac{m_{\text{projectile}}\, v_{\text{projectile}}}{m_{\text{arme}}}.$$

$$\text{A.N. } v_{\text{arme}} = \frac{0{,}015 \times 500}{3{,}5} = 2{,}1 \text{ m·s}^{-1}.$$

Cette valeur peut paraitre élevée. En réalité l'arme est en général tenue par le tireur et il faut alors prendre en compte la masse de celui-ci pour obtenir un résultat plus réaliste.

21. Exercice résolu dans le manuel

22. Application de l'exercice résolu

• Le parachutiste est en chute verticale à vitesse constante : son mouvement est donc rectiligne et uniforme.

• Le parachutiste est soumis à deux forces non négligeables d'expressions :

$$\vec{P} = m\vec{g} = mg\vec{j}$$

$$\vec{f} = -kv^2\vec{j}$$

avec $\vec{j}$ vecteur unitaire directeur de l'axe vertical orienté vers le bas.

Lorsque le parachutiste est en mouvement rectiligne et uniforme on a : $v_{\text{lim}} = \dfrac{L}{\Delta t}$

et d'après le principe d'inertie : $\vec{P} + \vec{f} = 0$.

En projection sur l'axe vertical, la relation vectorielle précédente donne :

$$mg - kv_{\text{lim}}^2 = 0 \quad \text{soit} \quad k = \frac{mg}{v_{\text{lim}}^2} = \frac{mg\Delta t^2}{L^2}.$$

$$\text{A.N. : } k = \frac{100 \times 9{,}8 \times 40^2}{2\,000^2} = 0{,}39 \text{ kg·m}^{-1}.$$

23. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. Par rapport au référentiel terrestre, l'échelle est en mouvement rectiligne uniforme.

Par rapport au référentiel du camion, l'échelle est immobile.

b. L'échelle est le système étudié : elle est soumise à son poids et à la réaction du support (on néglige l'action de l'air). Dans le référentiel terrestre considéré galiléen, elle est en mouvement rectiligne uniforme. D'après le principe d'inertie, elle constitue un système isolé : les deux forces se compensent.

Le raisonnement peut être effectué dans le référentiel du camion qui est aussi galiléen quand le camion est en mouvement rectiligne uniforme : l'échelle est alors au repos dans ce référentiel, elle constitue un système isolé et les deux forces se compensent toujours.

c. Lorsque le camion freine, l'étude du système est identique à celle réalisée dans la question **b.** Dans le référentiel terrestre : l'échelle persévère dans son mouvement et se déplace donc vers l'avant du camion qui ralentit. Par contre, le référentiel du camion n'est plus galiléen et le principe d'inertie ne s'applique plus.

d. Dans le référentiel terrestre, l'échelle est toujours le système étudié. Elle n'est soumise qu'à son poids. Le principe d'inertie ne s'applique pas car elle ne constitue pas un système isolé. Son centre d'inertie ne peut pas être en mouvement rectiligne uniforme et l'échelle tombe alors devant la voiture sous l'effet de son poids et de sa vitesse initiale.

24. Une fraction de seconde

> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider.**

On exprime la durée 32 millions d'années en seconde :

$\Delta t = 32$ millions d'années $= 32 \times 10^6 \times 365$ jours

$= 32 \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 3600 = 1{,}0 \times 10^{15}$ s.

Il y a le même rapport (10^{15}) entre une femtoseconde et une seconde, et entre une seconde et 32 millions d'années.

25. Observations et principe d'inertie

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

a. Richard Feynman décrit ses observations dans un référentiel lié au chariot.

b. Son père se place dans le référentiel terrestre.

c. Le système étudié est le ballon. Il est soumis à son poids et à la réaction du support, les deux forces se compensent, il est donc isolé.

D'après le principe d'inertie, le centre d'inertie du ballon est soit immobile, soit en mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen :

– si le chariot et le ballon sont initialement immobiles, lorsque l'on tire le chariot, le ballon garde sa position dans le référentiel terrestre, il « recule » dans le référentiel du chariot qui n'est pas galiléen ;

– si le chariot est en mouvement rectiligne uniforme, et qu'on l'arrête brusquement, le ballon persévère dans son mouvement rectiligne uniforme dans le référentiel terrestre galiléen. Il se précipite vers l'avant dans le référentiel du chariot qui n'est pas galiléen.

26. Conservation de la quantité de mouvement

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

La masse du gros poisson est notée *M*, celle du petit poisson *m*.

On étudie la quantité du mouvement du système constitué par les deux poissons « avant » puis « après » que le gros poisson ait avalé le petit.

Le système étant supposé isolé, la conservation de la quantité de mouvement donne :

$$\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$$

$$M\vec{V} = (M + m)\vec{V}'$$

$$V' = \frac{M}{M+m} V = \frac{\dfrac{M}{m}}{\dfrac{M}{m} + 1} V = \frac{4}{4+1} \times 5 = 4 \text{ km·h}^{-1}.$$

27. Exploitation de résultats expérimentaux

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, réaliser.**

a. Les trajectoires sont des droites. Les points sont régulièrement répartis : les vitesses sont constantes. *A* et *B* sont donc en mouvement rectiligne uniforme.

b. La vitesse est $v = \dfrac{d}{\Delta t}$, d étant la distance parcourue pendant un intervalle de temps Δt.
La distance parcourue par B est plus grande que la distance parcourue par A pendant le même intervalle de temps Δt donc : $v_B > v_A$.
B est le mobile qui a acquis la plus grande vitesse.
c. Les quantités de mouvement étant égales, $p_A = p_B$ soit $m_A v_A = m_B v_B$. Si $v_B > v_A$, $m_B < m_A$.
A est le mobile le plus lourd.

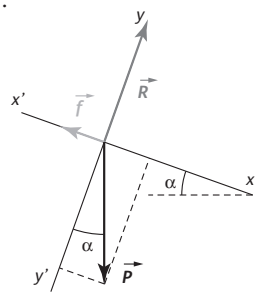
28. Détermination des caractéristiques d'une force

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. Le mouvement est rectiligne uniforme : $\overrightarrow{v_G} = \overrightarrow{\text{cte}}$

b. D'après le principe d'inertie, le référentiel terrestre étant considéré galiléen, si $\overrightarrow{v_G} = \overrightarrow{\text{cte}}$ alors $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$.
Le système étudié est alors isolé.

c. Le skieur est en interaction avec la Terre, le sol et l'air. Il subit trois actions modélisées respectivement par le poids $\vec{P}$, la réaction du sol $\vec{R}$ et la force de frottement de l'air $\vec{f}$.



D'après le principe d'inertie : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = \vec{0}$.
Suivant l'axe $x'x$ parallèle à la pente et l'axe $y'y$ normal à la pente :

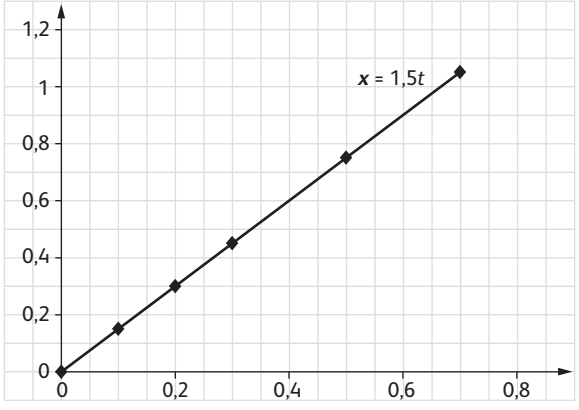
$P_x + R_x + f_x = 0$ $\qquad$ $P \sin \alpha + 0 - f = 0$
$P_y + R_y + f_y = 0$ $\qquad$ $-P \cos \alpha + R + 0 = 0$

La force $\vec{f}$ est telle que $\vec{f} = -f\vec{i}$ de valeur $f = P \sin \alpha$.
A.N. : $f = 70 \times 9{,}8 \times \sin 20° = 2{,}3 \times 10^2$ N.

29. Nature du mouvement

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. $x(t) = 1{,}5t$.



b. $v_x = \dfrac{dx}{dt} = 1{,}5 \text{ m·s}^{-1}$; $v_y = \dfrac{dy}{dt} = 0$.

c. Le vecteur vitesse est un vecteur constant car ses coordonnées sont constantes, la trajectoire est une droite et le mouvement est rectiligne uniforme.

30. Objet au repos

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, réaliser, valider.**



a. Le livre est en interaction avec la table et avec la Terre. On néglige l'action de l'air ambiant.
Les actions mécaniques qu'il subit sont : le poids $\vec{P}$ et la réaction du support $\vec{R}$.
Étant immobile dans le référentiel terrestre supposé galiléen, $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$; les deux forces sont opposées.
b. La table étant inclinée, la force $\vec{R}$ n'est plus normale à la table, il y a nécessairement des frottements. La représentation des forces n'est pas modifiée.

31. De la seconde à la femtoseconde

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, communiquer.**

a. Exemples d'événements et de durées associées

Événement	Durée	Ordre de grandeur en seconde
Reconnaissance d'une lettre par le cerveau	Quelques millisecondes	10^{-3}
Transport des signaux d'un neurone à l'autre	50 µs	10^{-4}
Trajet de la lumière de la page de la revue jusqu'à l'œil	Une à deux nanosecondes	10^{-9}
Trajet de la lumière à travers le cristallin	20 ps	10^{-11}
Impulsions laser les plus courtes que l'on sait produire aujourd'hui	Quelques femtosecondes	10^{-15}

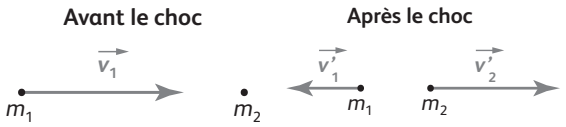
b. La durée des événements les plus courts que l'on peut enregistrer de nos jours est de l'ordre de la femtoseconde soit 10^{-15} s. Pour pouvoir avoir accès à la mesure de ces durées, il est nécessaire de pouvoir mesurer le temps avec une incertitude absolue au moins égale à 10^{-15} s, ce qui nécessite au minimum d'avoir l'unité seconde définie à 10^{-15} s près ce qui représente une incertitude relative (précision) de l'ordre de 10^{-15}.

32. Étude expérimentale de la conservation de la quantité de mouvement

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

L'exploitation consiste à schématiser la situation avant le choc puis après le choc (le choc s'effectuant sur un banc, les vecteurs vitesses sont colinéaires), puis à exprimer le vecteur quantité de mouvement du système avant et après le choc.
La quantité de mouvement est calculée avant puis après le choc. Si les deux valeurs sont égales, on pourra

conclure qu'il y a conservation de la quantité de mouvement pour le système.



Le vecteur quantité de mouvement avant le choc est :

$$\vec{p}_{\text{avant}} = m_1\vec{v}_1.$$

Le vecteur quantité de mouvement après le choc est :

$$\vec{p}_{\text{après}} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2.$$

En tenant compte du sens des vecteurs vitesses, on a :

$$p_{\text{avant}} = m_1v_1 \quad ; \quad p_{\text{après}} = -m_1v'_1 + m_2v'_2.$$

A.N. : $p_{\text{avant}} = 0{,}100 \times 5{,}0 = 5{,}0 \times 10^{-1}$ kg·m·s^{-1}.

$p_{\text{après}} = -0{,}100 \times 1{,}0 + 0{,}150 \times 4{,}0 = 5{,}0 \times 10^{-1}$ kg·m·s^{-1}.

Il y a conservation de la quantité de mouvement pour le système.

33. ★ *Base jump*

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser.**

a. Le mouvement est rectiligne uniforme si le vecteur vitesse est un vecteur constant : $\vec{v_G} = \overrightarrow{cte}$.

Le mouvement est étudié dans le référentiel terrestre considéré galiléen.

b. Les actions mécaniques qui s'exercent sur le système constitué par le *base jumper* et sa *wingsuit* sont : l'action exercée par l'air et l'action exercée par la Terre.

c. D'après le principe d'inertie, le mouvement étant rectiligne uniforme, le système (ramené à son centre d'inertie G) est isolé :

$$\vec{F} + \vec{P} = \vec{0} \quad \text{soit} \quad \vec{F} = -\vec{P}.$$

Le poids $\vec{P}$ est une force verticale dirigée vers le bas, de valeur $P = mg$;

$$P = 90 \times 9{,}8 = 8{,}8 \times 10^2 \text{ N}.$$

La force $\vec{F}$ est une force verticale dirigée vers le haut, de valeur $F = P$;

$$F = 8{,}8 \times 10^2 \text{ N}.$$



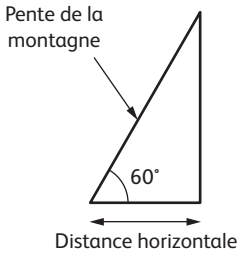
d. La durée du vol à la vitesse constante de valeur 160 km·h^{-1} est de $\Delta t = 36$ s.

La distance parcourue est donc :

$$d = v\Delta t = \frac{160}{3{,}6} \times 36 = 1\,600 \text{ m}.$$

La distance horizontale d_h couverte est donc :

$$d_h = d\cos\alpha = 1\,600 \times \cos(60°) = 800 \text{ m}.$$



34. ★ In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser.**

a. Vrai ; la quantité de mouvement est une grandeur vectorielle.

b. Faux ; l'unité de la valeur de la quantité de mouvement est kg·m·s^{-1}.

c. Vrai ; mais un objet a une quantité de mouvement lorsqu'il se déplace même si sa vitesse n'est pas constante.

d. Faux ; le vecteur quantité de mouvement a même direction et même sens que le vecteur vitesse.

e. Faux ; le vecteur quantité de mouvement d'un système ne se conserve que si le système est isolé.

f. Vrai ; le vecteur quantité de mouvement varie comme le vecteur vitesse.

g. Vrai ; si $v_1 = v_2$ mais $m_1 > m_2$ alors $p_1 > p_2$.

h. Faux ; si $m_1 < m_2$ mais $v_1 > v_2$, alors p_1 peut être plus grand que p_2.

35. ★ Éclatement d'un système

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. L'enregistrement du mouvement de *A* donne des points alignés et équidistants : le mouvement est rectiligne et uniforme. La valeur de la vitesse de *A* est calculée non pas sur un mais sur quatre intervalles de temps pour une plus grande précision :

$$v_A = \frac{2{,}2 \times 10^{-2} \times 3}{4 \times 2{,}0 \times 10^{-2}} = 0{,}83 \text{ m·s}^{-1}.$$

On détermine de même la vitesse de *B* :

$$v_B = \frac{1{,}6 \times 10^{-2} \times 3}{4 \times 2{,}0 \times 10^{-2}} = 0{,}60 \text{ m·s}^{-1}.$$

Les trajectoires de *A* et de *B* sont colinéaires, les vitesses de *A* et de *B* ont donc même direction mais des sens opposés.

b. Le vecteur quantité de mouvement de *A* est par définition :

$$\vec{p}_A = m_A\vec{v}_A.$$

Il a même direction et même sens que la vitesse de *A* ; sa valeur est :

$$p_A = m_Av_A = 0{,}720 \times 0{,}83 = 0{,}60 \text{ kg·m·s}^{-1}.$$

De même, le vecteur quantité de mouvement de *B* est par définition : $\vec{p}_B = m_B\vec{v}_B$.

Il a même direction et même sens que le vecteur vitesse de *B* ; sa valeur est :

$$p_B = m_Bv_B = 0{,}980 \times 0{,}60 = 0{,}59 \text{ kg·m·s}^{-1}.$$

c. Les vecteurs quantité de mouvement ont même direction et des sens opposés comme les vecteurs vitesse, leurs valeurs sont quasi égales : $\vec{p}_A = -\vec{p}_B$.

La conservation de la quantité de mouvement avant et après l'explosion du système constitué par les deux mobiles impose que $\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$.

Les mobiles avant l'explosion étant immobiles : $\vec{p} = \vec{0}$.

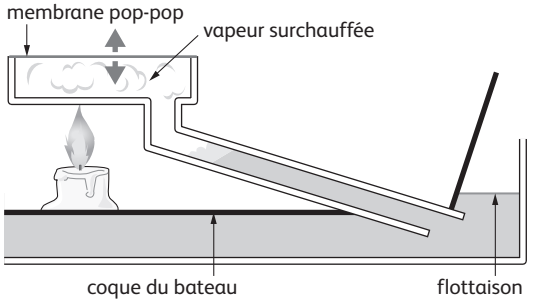
Après l'explosion, l'étude de l'enregistrement montre que : $\vec{p}_A + \vec{p}_B = \vec{0}$.

On a bien $\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$.

36. ★ Bateau pop-pop

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

a. Le moteur pop-pop est formé d'un petit réservoir situé dans le bateau et relié à deux fines tubulaires qui aboutissent sous le niveau de l'eau, à l'arrière du bateau.
Le réservoir et les tubulures sont remplis d'eau avant le démarrage.
Une bougie allumée est placée sous le réservoir. L'eau qu'il contient chauffe, se vaporise provoquant une déformation de la membrane souple qui ferme le réservoir à sa partie supérieure. On entend alors un bruit : « pop ». Simultanément, de l'eau est éjectée par les tubulures et le bateau avance. La pression ayant diminuée dans le réservoir, la membrane se déforme dans l'autre sens, de l'eau rentre dans le réservoir et le cycle recommence.
Le bateau avance en faisant « pop-pop » tant que la bougie brûle.



b. Au démarrage du bateau, la conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\vec{p}_{\text{eau éjectée}} + \vec{p}_{\text{bateau}} = \vec{0}$$

$$\text{soit } \vec{p}_{\text{bateau}} = -\vec{p}_{\text{eau éjectée}}.$$

Les vecteurs quantités de mouvement sont opposés, il y a propulsion par réaction.

37. ★ S'auto-évaluer

Dans un référentiel galiléen, le vecteur quantité de mouvement d'un système isolé est un vecteur constant.
Étudions le système constitué par le proton et le noyau d'hélium.
Avant le choc, la quantité de mouvement est celle du proton de masse m_p animé de la vitesse $\vec{v}$:

$$\vec{p}_{\text{avant}} = m_p\vec{v}.$$

Après le choc, la quantité de mouvement est celle du noyau d'hélium de masse m_{He} animé de la vitesse $\vec{v}_1$ et celle du proton de masse m_p animé de la vitesse :

$$\vec{p}_{\text{après}} = m_{He}\vec{v}_1 + m_p\vec{v}_2.$$

Le système constitué par le proton et le noyau d'hélium étant supposé isolé et le référentiel d'étude étant supposé galiléen, la quantité de mouvement de ce système se conserve :

$\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$ ce qui donne : $m_p\vec{v} = m_{He}\vec{v}_1 + m_p\vec{v}_2$.

Les vitesses étant colinéaires, la relation vectorielle projetée selon la direction de la trajectoire des particules est : $m_p v = m_{He}v_1 - m_p v_2$.

On en déduit le rapport des masses :

$$\frac{m_{He}}{m_p} = \frac{v + v_2}{v_1}$$

L'application numérique donne :

$$\frac{m_{He}}{m_n} = \frac{1{,}0 \times 10^6 + 6{,}0 \times 10^5}{4{,}0 \times 10^5} = 4$$

Soit $m_{He} = 4m_p$.

38. ★★ Détecteur d'impureté

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. La quantité de mouvement du système constitué par les deux protons s'écrit :

$\vec{p}_{\text{avant}} = m\vec{v}_1$, avant la collision

$\vec{p}_{\text{après}} = m\vec{v}_1' + m\vec{v}_2'$, après la collision.

Le système étant supposé isolé et le référentiel d'étude étant galiléen, la quantité de mouvement de ce système se conserve :

$$\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}} \text{ soit } m\vec{v}_1 = m\vec{v}_1' + m\vec{v}_2'$$

et en simplifiant par m :

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_2' \text{ (relation 1)}$$

b. La conservation de l'énergie cinétique donne :

$$\frac{1}{2}m v_1^2 = \frac{1}{2}m v_1'^2 + \frac{1}{2}m v_2'^2$$

soit après simplification :

$$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2 \text{ (relation 2)}$$

c. La relation 1 élevée au carré devient :

$$(\vec{v}_1)^2 = (\vec{v}_1' + \vec{v}_2')^2$$

$$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2 + 2\, v_1 \times v_2 \text{ (relation 3)}$$

En utilisant la relation 2, on obtient : $0 = \vec{v}_1' \cdot \vec{v}_2'$
Le produit scalaire des deux vecteurs étant nul, l'angle entre les deux vecteurs est un angle droit :

$$\theta + \psi = 90° ; \text{ avec } \theta = 30°, \psi = 60°.$$

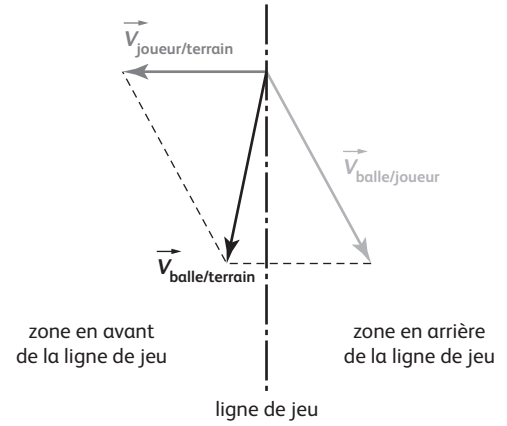
d. En présence d'une impureté, la collision ne se produit pas avec un angle de 90° entre les deux directions. Dans ce cas, les détecteurs placés à 90° l'un de l'autre ne détectent pas simultanément un signal.

39. ★★ Rugby

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

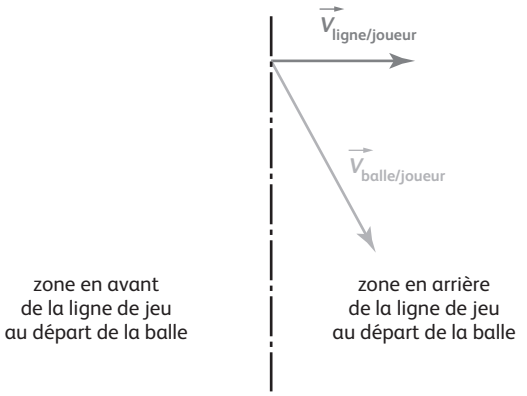
a. On peut consulter l'adresse ci-dessous pour découvrir la nouvelle règle d'arbitrage de la passe en avant :
http://www.lindependant.fr/2014/01/10/les-mains-de-la-discorde,1833348.php
D'après la nouvelle règle, la passe en avant est jugée maintenant selon le mouvement des mains du joueur lançant la balle et non plus selon la trajectoire du ballon dans le référentiel lié au terrain, comme c'était le cas auparavant. Ainsi le joueur qui lance le ballon fait bien une passe en arrière dans son propre référentiel mais il fait une passe avant au sens où la balle progresse dans le même sens que le joueur par rapport à la ligne de jeu.

Situation dans le référentiel terrestre
Schéma 1



La vitesse de la balle par rapport à la Terre (référentiel terrestre) est la somme de deux vitesses : la vitesse de la balle par rapport au joueur + la vitesse du joueur par rapport à la Terre. Dans la situation représentée la vitesse de la balle par rapport à la Terre présente une composante en avant de la ligne de jeu fixe dans le référentiel terrestre : la balle va atterrir en avant de la ligne de jeu sur le terrain.

Situation dans le référentiel du joueur qui lance le ballon
Schéma 2



Au moment où le joueur fait la passe, on voit la vitesse de la balle est bien orientée en arrière de la ligne de jeu : la balle est bien lancée en arrière par rapport à la ligne de jeu. Mais la ligne de jeu se déplace dans le référentiel lié au joueur. Il faut donc appliquer la règle au départ de la balle ce qui est bien conforme à son énoncé puisque c'est le mouvement des mains du joueur qui va déterminer le sens et la direction de la vitesse initiale de la balle dans le référentiel du joueur.

b. D'après le **schéma 1** de la question **a.**, on remarque que plus $\vec{v}_{joueur/terrain}$ sera de valeur élevée et plus la passe serait jugée en avant selon l'ancienne règle. Le problème disparait avec la nouvelle règle puisque la valeur de la vitesse du joueur par rapport au terrain n'intervient plus, ce qui avantage donc les joueurs les plus rapides car cela rend possible une progression plus rapide de la balle dans les lignes de l'équipe adverse !

40. ★★ Projet *Breakthrough Starshot*

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, communiquer.**

La description du projet *Breakthrough Starshot* dans le document 1 permet de relever les données essentielles du projet :

– la masse m de l'ensemble {sonde + voile solaire} de l'ordre de 1 gramme ;

– la puissance P du faisceau laser permettant de propulser la sonde de l'ordre de 100 GW ;

– la durée Δt de l'action du faisceau laser de l'ordre de 10 minutes ;

– l'énergie totale $\mathscr{E}_t$ effectivement récupérée par la voile lors de l'exposition au faisceau laser de l'ordre de 1 Téra-joule soit 10^{12} J ;

– la valeur de la vitesse finale v atteinte par la sonde de l'ordre de $0{,}2c$ soit $6\ 10^7$ m·s^{-1}.

De plus le document 2 explique qu'un photon possède une quantité de mouvement de valeur p_{photon} égale à $\frac{\mathscr{E}_{photon}}{c}$ et que dans le cas d'une voile parfaitement réfléchissante, un photon transfère à la voile une quantité de mouvement de valeur double à celle du photon incident, en raison de la conservation de la quantité de mouvement (en toute rigueur ceci n'est valable que si la voile a une vitesse négligeable devant la vitesse de la lumière. Si la voile possède une vitesse non négligeable par rapport à c alors le photon réfléchi n'a pas exactement la même fréquence à cause de l'effet Doppler et il ne possède donc pas exactement la même énergie).

On peut alors considérer que l'ensemble des photons qui ont transféré leur quantité de mouvement à la voile pendant la phase d'accélération est égale au double de l'énergie totale reçue $\mathscr{E}_t$ divisée par la célérité de la lumière soit :

$$2\sum p_{photon} = 2\sum \frac{\mathscr{E}_{photon}}{c} = \frac{2E_t}{c}$$

La voile, initialement au repos, acquiert alors la vitesse v et la valeur de sa quantité de mouvement est égale à :

$$p_{voile} = mv.$$

On a alors :

$$p_{voile} = 2\sum p_{photon} = 2\sum \frac{\mathscr{E}_{photon}}{c}$$

soit :

$$mv = \frac{2\mathscr{E}_t}{c}$$

$$v = \frac{2\mathscr{E}_t}{mc}$$

$$\text{A.N. : } v = \frac{2\times 100\times 10^9\times 600}{0{,}001\times 3\times 10^8} = 4{\cdot}10^7 \text{ m·s}^{-1}$$

soit une vitesse de l'ordre de 0,1 c.

En conclusion, les données semblent cohérentes en ordre de grandeur. En réalité la valeur de la vitesse obtenue doit être plus faible car la voile ne sera jamais

parfaitement réfléchissante dans la direction des photons incidents.
La conservation de l'énergie indique également que cette valeur est surestimée. L'énergie effectivement reçue par la voile valant 1 J (= 10^{-12} J), en négligeant les effets relativistes, on peut écrire que :

$$\mathscr{E}_t = \frac{1}{2} mv^2$$

soit $v = \left(\frac{2\mathscr{E}_t}{m}\right)^{0,5} = \left(\frac{2 \times 10^{12}}{0,001}\right)^{0,5} = 4,4 \times 10^7 \text{ m·s}^{-1}$.

On peut remarquer qu'une faible partie de l'énergie produite par le faisceau laser est effectivement transférée à la voile (de l'ordre de $\frac{10^{12}}{10^{11} \text{ W} \times 600 \text{ s}} = 0,016 = 1,6\,\%$).
De plus cette énergie n'est en réalité pas transmise « d'un seul coup » et un calcul plus rigoureux sur la conservation de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie montre que l'énergie transmise par unité de temps (la puissance) est d'autant plus grande que l'effet Doppler est important. La transmission de l'énergie est d'autant plus efficace que la vitesse de la voile est grande ce qui est logique car la puissance transmise à la voile s'écrit comme le produit de la force de poussée (dérivée de la quantité de mouvement par rapport au temps) par la vitesse de la voile. On trouve alors que l'énergie transmise par unité de temps varie de quasiment 0 % lorsque la vitesse de la voile est nulle à 15 % lorsque la vitesse de la voile est de $4 \cdot 10^7$ m·s^{-1}, la valeur moyenne de 1,6 % étant bien encadrée par ces deux valeurs.

EXERCICES Objectif BAC

41. L'EXPÉRIENCE DE MILLIKAN

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. a. La gouttelette possède un mouvement rectiligne uniforme dans le référentiel du laboratoire. D'après le principe d'inertie, les forces exercées sur la gouttelette se compensent :

$$\vec{P} + \vec{f} = 0 ;$$
$$\vec{P} = -\vec{f} = 6 \times \pi \times \eta \times r \times \vec{v_1} \text{ donc } P = f$$
soit, $m \cdot g = 6 \times \pi \times \eta \times r \times v_1$
$$v_1 = \frac{m \times g}{6 \times \pi \times \eta \times r}.$$

b. $v_1 = \frac{2}{9} = \frac{\rho \times g \times r^2}{\eta} = \frac{d}{\Delta t}$

$$\Rightarrow r^2 = \frac{d \times \eta}{\rho \times g \times \Delta t} \times \frac{2}{9}$$

$$r = \sqrt{\frac{d \times \eta}{\rho \times g \times \Delta t} \times \frac{9}{2}}$$

$$r = \sqrt{\frac{2,11 \times 10^{-3} \times 1,8 \times 10^{-5}}{890 \times 9,8 \times 10,0} \times \frac{9}{2}}$$

$r = 1,4 \times 10^{-6}$ m $= 1,4$ µm.

2. On utilise directement les données du document 2 donnant la valeur de la charge électrique portée par chaque goutte pour calculer la valeur du rapport $\frac{|q|}{e}$ avec e qui représente la charge élémentaire ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Voir le tableau en bas de page.

Le rapport $\frac{|q|}{e}$ est toujours égal à un nombre entier,

$\frac{|q|}{e} = n$ soit $|q| = \text{n} \times \text{e}$.

La charge électrique des gouttelettes est effectivement quantifiée.

42. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Décollage du lanceur Ariane 5

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

1. La vidéo du document 1 montre que la fusée se sépare des moteurs à poudre environ deux min et 10 s après le décollage de la fusée.
Les données disponibles au décollage telles que la masse m_0 de la fusée au décollage, le débit d'éjection D des gaz et la vitesse d'éjection v_g des gaz permettent de connaître la masse m_f de la fusée qui décroit au cours du temps.
Si on veut connaître la valeur v_f de la vitesse de la fusée, on peut envisager d'appliquer la conservation de la quantité de mouvement car on connait le débit massique D qui permet de connaitre la masse de gaz éjectés au cours du temps et la vitesse d'éjection v_g des gaz (en supposant que D et v_g soient constants).
Enfin, il est nécessaire de faire des hypothèses pour traiter ce problème simplement avec la conservation de la quantité de mouvement.

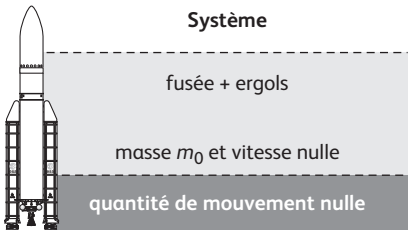
Tableau de la question 2. de l'exercice 41 :

Numéro de la gouttelette	1	2	3	4	5
Valeur absolue $\lvert q \rvert$ de la charge q de la gouttelette	$6,4 \times 10^{-19}$	$8,0 \times 10^{-19}$	$9,6 \times 10^{-19}$	$1,6 \times 10^{-18}$	$9,6 \times 10^{-19}$
Rapport $\frac{\lvert q \rvert}{e}$	4	5	6	10	6

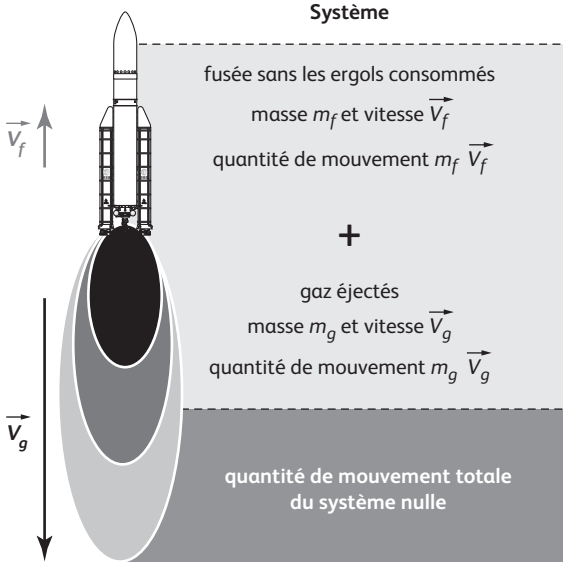
• Hypothèse 1 : on considère que le système {fusée + gaz éjectés} est un système isolé et que l'on peut appliquer la conservation de la quantité de mouvement. Cela revient à négliger l'influence du poids ainsi que l'action des frottements de l'air sur la fusée dans la résolution de ce problème.

• Hypothèse 2 : à la date $t = 0$ s le système est en une seule partie (fusée + ergols) et à la date $t = 2$ mn 10 s le système s'est séparé brusquement en deux parties : fusée sans les ergols consommés et gaz éjectés. Dans cette vision des choses, on ne prend pas en compte le fait que les variations de la vitesse et des masses de la fusée et des gaz éjectés sont, en réalité, continues dans le temps.

État initial : date $t = 0$ s



État final : date $t = 2$ min 10 s



$\vec{p}_{\text{initiale}} = \vec{p}_{\text{finale}}$ ce qui donne : $\vec{0} = m_f \vec{v}_f + m_g \vec{v}_g$.

Soit en projection suivant un axe vertical :

$$- m_f v_f = m_g v_g$$

$$\text{d'où } v_f = \frac{m_g v_g}{m_f} = \frac{m_g v_g}{m_0 - m_g}.$$

On peut exprimer la masse des gaz éjectés avec le débit D et le temps écoulé Δt :

$$m_g = D\Delta t.$$

L'expression de la vitesse de la fusée devient alors :

$$v_f = \frac{D\Delta t v_g}{m_0 - D\Delta t}.$$

$$\text{A. N. : } v_f = \frac{2{,}9 \cdot 10^3 \times 130 \times 4{,}0 \times 10^3}{780 \times 10^3 - 2{,}9 \times 10^3 \times 130}$$

$$= 3{,}7 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. D'après la vidéo du document 1, la fusée atteint une vitesse de 2,0 km·s^{-1} 2 min 10 s après le décollage. Le document 2 confirme cette information. L'ordre de grandeur de la vitesse obtenue par le calcul (le km.s^{-1}) est donc correct mais la valeur obtenue est quasiment deux fois supérieure à la valeur réelle. En réalité le système n'est bien sûr pas isolé, le poids et l'action des frottements de l'air sont loin d'être négligeables.

Note : c'est l'hypothèse 1 (système isolé) qui est ici la plus contestable car la résolution de ce problème avec prise en compte du poids et utilisation de la seconde loi de Newton (hors contexte dans ce chapitre) mais en gardant l'hypothèse 2 (ce qui évite de résoudre le problème en terme de résolution de l'équation différentielle du mouvement) montre que l'on s'approche beaucoup mieux de la vitesse réelle, la valeur trouvée étant alors de 2,5 km·s^{-1}.

La prise en compte des forces de frottements de l'air, qui agissent significativement seulement dans les basses couches de l'atmosphère permettrait probablement d'améliorer encore ce résultat.

CHAPITRE

8

COMPRENDRE

Lois de Newton

> Manuel pages 170 à 195

Choix pédagogiques

Ce chapitre fait partie de l'ensemble des trois chapitres consacrés aux lois de Newton et à leur mise en œuvre dans l'étude de mouvements. Nous avons choisi :
– d'introduire ici le concept d'accélération ainsi que les deuxième et troisième lois de Newton ;
– de ne traiter que les cas de mouvements d'objets se déplaçant dans des champs uniformes (de pesanteur et électrique).
Dans ce deuxième chapitre traitant de la mécanique, conformément au programme, nous avons privilégié l'étude de mouvements de points matériels, mais lorsque le système étudié ne pouvait être modélisé par un point matériel, nous avons été amenés à analyser le mouvement du centre d'inertie du système.
La première activité documentaire proposée introduit le concept d'accélération. Puis, à l'aide des activités expérimentales et d'une démarche d'investigation, les élèves mettent en œuvre les lois de Newton, étudient des mouvements rectilignes et paraboliques et apprennent à reconnaître leurs caractéristiques.
Dans ce chapitre, afin d'aider les élèves dans leur apprentissage, nous avons tout particulièrement développé l'articulation entre les différentes représentations (dessins, schéma, représentations vectorielles, représentations graphiques en fonction du temps, de la position).
Des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Lors du vol acrobatique d'un parapente, il est possible d'effectuer d'impressionnantes figures, comme des virages à 360° en miroir.

Quelle est la loi qui permet d'expliquer ces figures ?

Le plan de la photographie (prise du sol) est un plan horizontal, parallèle au sol. Les trajectoires des pilotes sont matérialisées par les traces de fumée laissées par les fumigènes et l'on voit que les mouvements des deux systèmes {parapente, pilote} sont complexes (les deux trajectoires des deux pilotes sont en fait hélicoïdales et quasiment symétriques par rapport à un axe vertical passant entre les deux ailes). On peut voir sur la photo que chaque pilote agit sur son aile en déformant son profil par l'intermédiaire de deux poignées de commande. L'action de l'air sur la voile est alors modifiée ce qui entraine une modification globale du mouvement du système {parapente, pilote}. Le choix de cette photo a été fait pour montrer que la modification du mouvement d'un système résulte des forces qui s'appliquent dessus : la somme des forces, si elle est non nulle, provoque une modification du mouvement ce qui est une première approche qualitative de la seconde loi de Newton.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Vitesse et accélération

Commentaires

L'objectif de cette activité documentaire est de donner du sens au concept d'accélération en s'appuyant sur des situations connues des élèves. Seules les notions de valeur de l'accélération et d'accélération moyenne sont abordées dans cette première approche.

Réponses

RÉALISER

1. a. Lors de la phase initiale de propulsion hydraulique en mouvement horizontal, l'accélération moyenne du train est de $a = \dfrac{\dfrac{190}{3{,}6}}{3{,}8} = \dfrac{53}{3{,}8}$ soit $a = 14\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

L'accélération est donc plus de 10 fois plus importante que l'accélération de confort d'un ascenseur.
Lors de la phase de descente, l'ordre de grandeur de l'accélération est celui de la valeur g du champ de pesanteur terrestre, soit $10\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. On peut estimer cette valeur en regardant la vidéo et en chronométrant la durée de la phase de descente, soit environ 5 s. La vitesse maximale en bas de la descente ne pouvant excéder $190\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ soit $53\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, on en déduit que l'accélération moyenne

maximale vaut $\frac{53}{5} = 1 \times 10^1$ m·s, soit environ 10 m·s^{-2} en ordre de grandeur.

b. Pour atteindre la vitesse maximale de 18 m·s^{-1}, il faudra une durée de $\Delta t = \frac{|\Delta t|}{5} = \frac{18}{1{,}2}$ soit $\Delta t = 15$ s.

L'article publié sur le site Internet suivant met en évidence les difficultés techniques à surmonter dans la conception d'ascenseurs de très grande hauteur :
http://www.usinenouvelle.com/article/les-ascenseurs-a-l-assaut-de-la-tres-grande-hauteur.N49326

S'APPROPRIER

2. Une recherche sur Internet fournit de nombreux sites sur les accélérations maximales atteintes lors de vols par les pilotes de chasse (9G soit 90 m·s^{-2}) et les traumatismes que ces derniers peuvent endurer (troubles de la vision, pertes de connaissance, problème de circulation sanguine, etc). Des vidéos tournées dans des simulateurs de vol montrent ces limites physiologiques (voir par exemple la vidéo sur YouTube « centrifugeuse 9G Blackout GLOC »).

Les astronautes subissent également des accélérations très importantes (du même ordre de grandeur que les pilotes de chasse) et suivent un entraînement pour s'y habituer.

Plusieurs moyens sont utilisés pour prévenir les troubles (graves) dus aux fortes accélérations :

– entraînement sur des simulateurs (centrifugeuses humaines) ;

– port d'une combinaison anti-G qui permet de limiter les troubles durant les vols (combinaison qui exerce une pression sur les jambes du pilote, lors de l'accélération, pour empêcher le sang de refluer de la tête vers les jambes).

– position «allongée» (perpendiculaire à la direction de l'accélération) des astronautes lors du décollage de la fusée.

Des sites fournissent des données sur l'entraînement et les centrifugeuses comme par exemple :
http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/7278-l-homme-dans-l-espace.php#question2
http://www.atlasaerospace.net/eng/centr-tech.htm.

Remarque : dans le chapitre 9, une activité porte sur les caractéristiques de l'accélération dans une centrifugeuse. On y retrouve explicitement le lien entre l'accélération exprimée en m·s^{-2} et l'accélération exprimée en G.

Par comparaison, si l'on choisit comme référence pour les pilotes et astronautes une accélération de 9G (soit environ 90 m·s^{-2}) on obtient pour le *Top thrill dragster* :

$$\frac{a_{\text{Ttd}}}{a_{\text{pilote}}} = 16\ \%.$$

L'accélération calculée pour la cabine du *Top thrill dragster* représente environ 15 % de l'accélération que peuvent subir les pilotes de chasse ou de navettes spatiales.

Pour les ascenseurs du *Burj Kalifa* :

$$\frac{a_{\text{asc}}}{a_{\text{pilote}}} = 1{,}3\ \%.$$

L'accélération de l'ascenseur ne représente que 1 % de l'accélération que peuvent subir les pilotes de chasse ou de navettes spatiales.

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Chute libre dans un champ de pesanteur uniforme

Commentaires

Dans cette activité, les élèves doivent d'abord *réaliser* l'enregistrement d'un lancer de balle, le relevé des points, puis *analyser* les résultats, d'abord qualitativement, puis quantitativement à partir des graphes obtenus. Ils sont ainsi amenés à faire le lien avec leurs connaissances sur les mouvements rectilignes uniformes et uniformément variés et sur la loi de Newton. La v*alidation* est faite lors de la confrontation entre le résultat expérimental et la valeur théorique de l'accélération (**3. c.**) : cette validation amène à discuter des valeurs des coordonnées de l'accélération $\vec{a}$ obtenues expérimentalement et à s'interroger sur l'expérience réalisée pour expliquer des écarts éventuels. Enfin les élèves *communiquent* leurs résultats dans la dernière question.

L'exploitation qui suit est réalisée à partir d'une vidéo disponible sur le site compagnon du manuel :
sirius.nathan.fr/sirius2017

Réponses

RÉALISER

1. a. Pour l'enregistrement du mouvement de la balle, consulter la partie 1 de la fiche pratique p. 591 du manuel. **Il est impératif de travailler avec suffisamment de lumière** et d'avoir accès, dans la mesure du possible, à un réglage manuel des paramètres vidéos, en particulier de la luminosité et de la vitesse d'obturation (ou d'un réglage équivalent). À noter que le réglage de la vitesse d'obturation n'est en général pas disponible sur les webcams bon marché.

Enfin, la balle doit être lancé dans le plan du repère d'étalonnage (ou dans un plan parallèle au plus proche du plan du repère d'étalonnage) pour éviter les erreurs d'étalonnage.

La vidéo utilisée ci-après pour illustrer l'activité a été réalisée avec un simple smartphone. Un petit projecteur halogène de 150 W a été utilisé pour l'éclairage. La vitesse d'obturation n'est pas directement accessible mais un réglage sensiblement équivalent « luminosité » a été fixé à –2 sur une échelle allant de –2 à +2.

La vidéo obtenue présente des images de la balle floues pour les vitesses les plus importantes mais l'exploitation est néanmoins largement faisable et donne des résultats tout à fait corrects. La vidéo a ensuite été ré-encodée, à l'aide du logiciel *FormatFactory* (https://format-factory.fr.softonic.com/), au format .avi avec le

codec XVID, (disponible dans n'importe quel pack de CODECS comme https://k-lite-codec-pack-full.fr.softonic.com/) pour pouvoir être ensuite découpée avec VirtualDub (https://virtualdub.fr.softonic.com/) et lisible sur la plupart des logiciel de pointage.

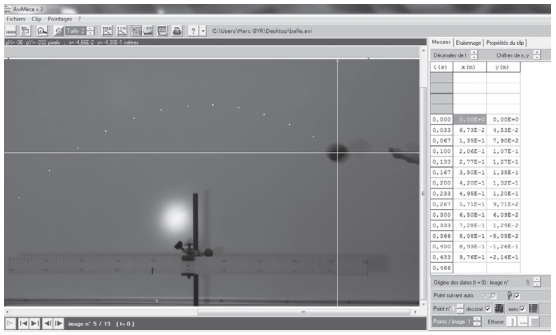
b. *Données*

Remarque : pour lire tous les détails des captures d'écran suivantes, il est conseillé d'utiliser la version pdf du livre du professeur disponible sur le site compagnon et dans le manuel numérique.

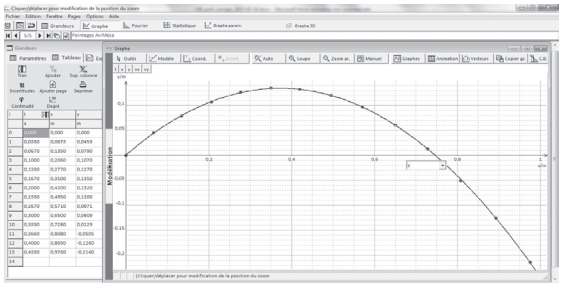
– Masse de la balle de squach $m = 40{,}83$ g ; diamètre de la balle $d = 4{,}0$ cm ; durée entre deux images : $\Delta t = 1/30$ s ; échelles : 1,01 m pour la longueur totale d'une règle.

– Le pointage est effectué à partir de la première image qui montre la balle libérée de l'action de la main du lanceur. L'axe $x'x$ est horizontal et orienté vers la gauche et l'axe $y'y$ est vertical et orienté vers le haut.

– On obtient le relevé ci-dessous (utilisation du logiciel *Aviméca*) :

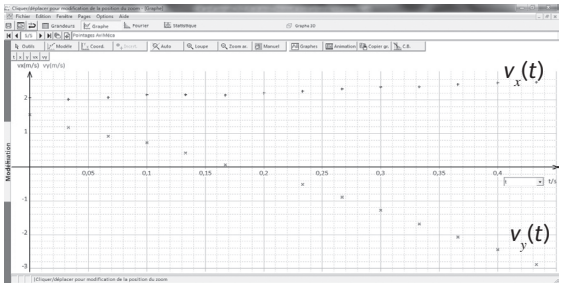


Représentation graphique de y en fonction de x en repère orthonormé, sous *Regressi* :



c. On obtient $v_x(t)$ et $v_y(t)$ par dérivation numérique par rapport à t de $x(t)$ et $y(t)$.

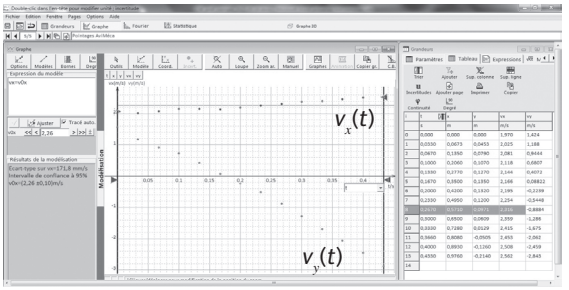
Le nombre de points utilisés pour le calcul de la dérivée (de type algorithme parabolique) est de 3 sous *Regressi*.



Les valeurs $v_x(t)$ sont pratiquement égales ; le mouvement est quasiment uniforme selon l'axe horizontal. On note cependant une tendance faiblement croissante pour $v_x(t)$, ce qui est l'indice que le mouvement de la balle n'était probablement pas exactement dans le plan de la règle étalon. Les points représentatifs de $v_y(t)$ sont globalement alignés : $v_y(t)$ est modélisable par une fonction affine du temps.

d. Les résultats de la modélisation sont :

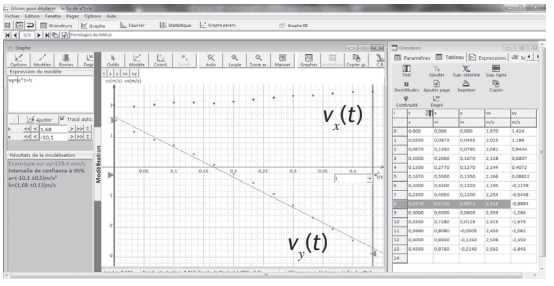
– Mouvement de B sur l'horizontale : on modélise $v_x(t)$ par une fonction constante. $v_x(t)$ est modélisée par la droite d'équation : $v_x(t) = v_{ox} = 2{,}26$ m·s^{-1} (droite horizontale en bleu sur le graphique ci-dessous).



– Mouvement de B sur la verticale : la vitesse verticale est une fonction affine du temps et la pente de la droite représentative est négative. $v_y(t)$ peut être modélisée par une droite d'équation :

$v_y(t) = at + b = -10{,}1 \times t + 1{,}68 = a_y t + v_{oy}$

donc $v_{oy} = 1{,}68$ m·s^{-1} et $a_y = -10{,}1$ m·s^{-2} (droite oblique sur le graphique ci-dessous).



De $t = 0$ à $t = 0{,}165$ s, on a $v_y(t) > 0$; le mouvement se fait dans le sens positif de l'axe (vers le haut), mais $v_y(t)$ diminue, le mouvement est donc uniformément décéléré dans cette phase.

Pour $t > 0{,}165$ s, on a $v_y(t) \leqslant 0$, le mouvement du projeté de B sur l'axe (O, j) se fait dans le sens négatif de l'axe et la valeur de la vitesse $|v_y(t)|$ augmente. Dans cette phase le mouvement est donc uniformément accéléré.

En résumé, le mouvement est uniformément varié selon l'axe y.

v_{ox} et v_{oy} représentent les coordonnées du vecteur vitesse à la date du lancement. On peut retrouver la valeur v_o de la vitesse initiale et l'angle de tir α :

$v_0 = \sqrt{v_{0_x}^2 + v_{0_y}^2} = \sqrt{2{,}26^2 + 1{,}68^2} \approx 2{,}82$ m·s^{-1}.

$\tan\alpha = \dfrac{v_{oy}}{v_{ox}} = \dfrac{1{,}68}{2{,}26} = 0{,}737$ soit $\alpha = 36{,}4°$, valeur que l'on

peut mesurer sur la courbe représentative de la trajectoire, en mesurant l'angle que fait la tangente à l'origine avec la direction horizontale .

S'APPROPRIER

2. Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre.

VALIDER

3. a. L'observation se fait sur les courbes $x(t)$ du mouvement du point *B* sur l'horizontale et $y(t)$ du mouvement de *B* sur la verticale. Les élèves doivent interpréter les variations de x et y pendant des durées successives égales. Voir le tableau en bas de page.

b. On obtient les coordonnées du vecteur accélération en dérivant par rapport au temps les expressions de v_x et de v_y :

$$a_x(t) = 0 \quad \text{et} \quad a_y(t) = -10{,}1 \text{ m·s}^{-2}.$$

Le vecteur accélération est donc vertical, de sens vers le bas et de valeur constante :

$$a = 10{,}1 \text{ m·s}^{-2}.$$

c. La deuxième loi de Newton appliquée à la balle dans le champ de pesanteur terrestre uniforme entraîne : $\vec{a} = \vec{g}$. On retrouve bien les caractéristiques du vecteur accélération avec un écart relatif sur la valeur de l'accélération de $\dfrac{10{,}1 - 9{,}8}{9{,}81} = 0{,}03 = 3\,\%$.

3. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

Trajectoire des électrons dans un champ électrique

Commentaires

L'objectif principal de cette activité est *l'appropriation* par les élèves des liens entre champ électrique et mouvement d'une particule chargée (accélération et déviation). Cette activité, se réalise à partir d'une photographie qui peut être réalisée en classe ; elle permet d'étudier plus directement et complètement un dispositif et une expérience qui sont traditionnellement présentés au bureau.

Dans cette activité, les élèves *analysent* dans un premier temps le dispositif expérimental et, dans un deuxième temps, l'image de la trajectoire du faisceau d'électrons, après avoir *réalisé* l'acquisition d'un ensemble de points avec un logiciel de pointage sur image.

Le traitement des données est ensuite réalisé avec un logiciel connu des élèves.

L'écart entre le modèle théorique et le modèle expérimental amène à discuter des hypothèses qui ont été choisies pour élaborer le modèle théorique : la compétence *valider* est donc ici tout particulièrement travaillée.

Réponses

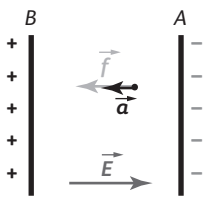
ANALYSER

1. *Le canon à électrons*

a. L'électron est accéléré entre *A* et *B* : la force $\vec{f}$ résulte de l'action du champ $\vec{E}$ sur l'électron chargé négativement, de charge –e. Le champ $\vec{E}$ est un champ électrostatique uniforme créé par les deux plaques *A* et *B* : $\vec{E}$ est perpendiculaire aux plan des deux plaques *A* et *B*. La force $\vec{f}$, colinéaire au champ $\vec{E}$, est donc orientée de *A* vers *B* (l'électron est accéléré de *A* vers *B*) et suivant une direction perpendiculaire aux plaques *A* et *B* car le faisceau est rectiligne. On en déduit que le champ $\vec{E}$ est orienté de *B* vers *A* car il est de direction opposé à la force $\vec{f}$. L'accélération $\vec{a}$ est colinéaire à la force $\vec{f}$.

A′ est chargée négativement et *B′* positivement.

b. Les caractéristiques de la force électrique $\vec{f}$ qui s'exerce sur un électron, de son accélération $\vec{a}$ et du champ $\vec{E}$ sont représentées sur le schéma ci-contre.



2. *Le dispositif de déviation du faisceau d'électrons*

a. Entre *A′* et *B′*, l'électron est dévié dans une direction perpendiculaire au plan des plaques *A′* et *B′* : la force $\vec{f'}$ résulte de l'action du champ $\vec{E'}$ sur l'électron chargé négativement, de charge –e. Le champ $\vec{E'}$ est un champ électrostatique uniforme créé par les deux plaques *A′* et *B′* : $\vec{E'}$ est perpendiculaire au plan des deux plaques *A′* et *B′*. La force $\vec{f'}$, colinéaire au champ $\vec{E'}$, est donc orienté de *A′* vers *B′* (l'électron est accéléré de *A′* vers *B′*) et suivant une direction perpendiculaire aux plaques *A′* et *B′*. On en déduit que le champ $\vec{E'}$ est orienté de *B′* vers *A′* car il est de direction opposé à la force $\vec{f'}$. L'accélération $\vec{a'}$ est colinéaire à la force $\vec{f'}$. *A′* est chargée négativement et *B′* positivement.

b. En tenant compte du sens de la déviation du faisceau d'électrons, on établit les caractéristiques de la force électrique $\vec{f'}$ qui s'exerce sur un électron, de son accélération $\vec{a'}$ et du champ $\vec{E'}$. Les caractéristiques de la force électrique, du champ et de l'accélération de l'électron sont représentées sur le schéma ci-contre.

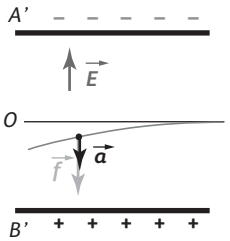


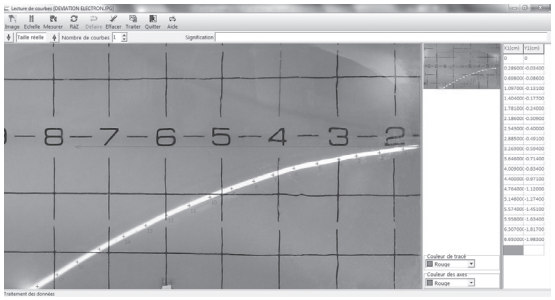
Tableau de la question 3.a de l'activité 2 :

	Mouvement de *B* sur l'horizontale		Mouvement de *B* sur la verticale	
Situation	**Coordonnée v_x de la vitesse de B**	**Nature du mouvement horizontal**	**Coordonnée v_y de la vitesse de B**	**Nature du mouvement vertical**
La balle s'élève en altitude	constante	uniforme	diminue	décéléré
La balle redescend	constante	uniforme	augmente (en valeur absolue)	accéléré

RÉALISER

3. Les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus avec la photographie disponible sur le site compagnon. Celle-ci a été découpée pour ne garder que la partie montrant le faisceau d'électron, puis la photo a été réorienté en rotation pour rendre horizontal l'axe central comportant les graduations. La déformation des graduations est probablement due au fait que l'écran gradué est enfermé dans une ampoule de verre.

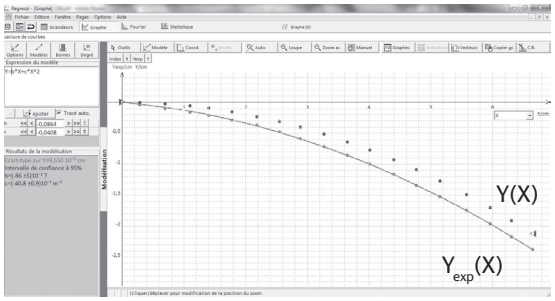
On choisit un repère orthonormé, d'axe horizontal $(O, \vec{i})$ orienté positivement vers la droite et d'axe vertical $(O, \vec{j})$ orienté positivement vers le haut.



Copie d'écran obtenue à la fin du pointage réalisé sur la photographie agrandie et redressée en utilisant le logiciel Regavi.

VALIDER

4. a.



Représentation du relevé du pointage et de la courbe expérimentale modélisée $Y_{exp}(X)$ et les points de la courbe théorique Y(X).

Sur la représentation précédente, on note l'écart entre la courbe expérimentale ($Y_{exp}(X)$) et la courbe théorique (Y(X)). Celle-ci s'appuie sur les hypothèses suivantes :

– champ électrique uniforme et limité à la seule zone intérieure au condensateur plan,

– valeur v_0 de la vitesse identique à celle en sortie du canon.

On note que la tangente en O à la trajectoire (courbe en rouge) n'est pas horizontale, donc que les électrons ne pénètrent pas dans l'espace du condensateur avec la direction de l'axe $x'x$. Ils ont été déviés par un champ électrique existant au voisinage du condensateur.

b. Équations de la courbe :

– théorique : $Y = -4{,}8X^2$ (X en cm ici alors que la modélisation de la copie d'écran indique X en m);

– expérimentale : $Y_{exp} = -4{,}08X^2 + 0{,}0864X$.

Remarque : l'expérience est réalisée avec la même tension U entre les plaques accélératrices AB et de déviation $A'B'$. Dans le canon à électron, la valeur v_0 de la vitesse de sortie est obtenue avec :

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = eU.$$

En notant v_0' la valeur de la vitesse d'entrée des électrons entre les plaques $A'B'$ de déviation, α l'angle d'entrée, l'équation de la trajectoire est :

$$y = -\frac{1}{2} \times \frac{e}{m} \times \frac{U}{d} \times \frac{x^2}{v_0'^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha.$$

En éliminant U et m on obtient :

$$y = \frac{x^2}{4d} \times \frac{v_0^2}{v_0'^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha.$$

La comparaison avec les valeurs de la modélisation donne, en appelant K le rapport des vitesses :

$$-4{,}08 = -\frac{1}{4d} \left(\frac{K}{\cos \alpha} \right)^2$$

$$0{,}0864 = \tan \alpha.$$

On trouve un angle de 4,9° et un rapport $K = \frac{v_0}{v_0'} = 0{,}92$.

Ces résultats montrent que le champ entre les deux plaques de déviation n'est certainement pas nul au voisinage de la zone d'entrée des électrons : déviation du faisceau avant l'entrée et modification de la vitesse entre les deux systèmes accélérateur et de déviation.

4. DÉMARCHE D'INVESTIGATION

Détermination de la force de poussée d'une fusée à air

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guide élève et professeur sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

EXERCICES Appliquer le cours

De la vitesse à l'accélération (§1 du cours)

12. Représenter la vitesse et l'accélération

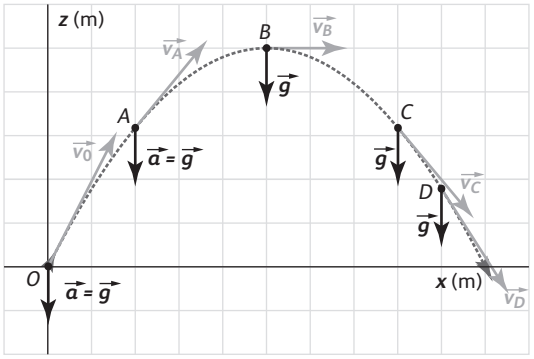
a. La valeur de l'accélération est :

$$a = \frac{|\Delta v|}{\Delta t} = 2 \text{ m·s}^{-2}.$$

b. Le mouvement du point est uniformément décéléré : le vecteur accélération est donc de sens opposé au vecteur vitesse. On choisit un sens de déplacement : le vecteur vitesse $\vec{v}$ a le sens du déplacement et sa valeur diminue alors que le vecteur accélération $\vec{a}$ est dans le sens opposé au vecteur vitesse $\vec{v}$ et garde une valeur constante.



13. Caractériser les vecteurs vitesse et accélération
Le vecteur accélération est constant : $\vec{a} = \vec{g}$.
Le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du déplacement :
– sa composante sur la direction horizontale est constante ;
– sa composante sur la direction verticale diminue jusqu'au point *B* où elle s'annule puis augmente lors de la descente.
La valeur de la vitesse est la même aux points *A* et *C*, les vecteurs vitesse ont même valeur mais des sens et des directions différentes.

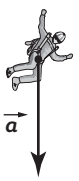
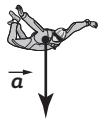


Les lois de Newton (§2 du cours)

14. Caractériser une accélération lors d'un saut
a. et b. Le parachutiste équipé est le système choisi. Les forces qui s'exercent sur le système sont : son poids $\vec{P}$ de valeur $P = 800$ N et la force $\vec{F_{air}}$ due à l'air.
En appliquant la deuxième loi de Newton au système dont la masse est constante :

$$\vec{P} + \vec{F_{air}} = m\,\vec{a}$$

Le vecteur accélération $\vec{a}$ est vertical vers le bas et sa valeur est $a = \dfrac{P - F_{air}}{m}$.

	1	2	3	4
Accélération	$a = 10$ m·s^{-2} 	$a = 5{,}6$ m·s^{-2} 	$a = 1{,}2$ m·s^{-2} 	$a = 0$ m·s^{-2} 
Nature du mouvement	accéléré	accéléré	accéléré	uniforme

Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme (§3 du cours)

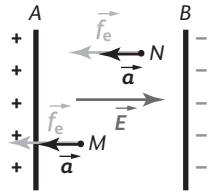
15. Étudier le lancer d'une bille
a. À $t_0 = 0$, la bille est à :
$z = -0{,}5 \times 9{,}8 \times 0 + 5 \times 0 + 1{,}2 = 1{,}2$ m.
b. $v_z(t) = \dfrac{dz}{dt} = -gt + v_{0z}$;
$v_z(t_0) = v_{0z} = 5{,}0$ m·s^{-1}.
c. $v_{0z} > 0$: le vecteur $\vec{v_0}$ a donc le même sens que $z'z$, la balle est donc lancée vers le haut.
d. Quand la vitesse s'annule

$$v_z(t_1) = -gt_1 + v_{0z} = 0 \quad \text{soit} \quad t_1 = \frac{v_{0z}}{g} = 0{,}51 \text{ s.}$$

Sa position est alors $z_1 = 0{,}5 \times 9{,}8 \times t^2{}_1 + 2t_1 + 1{,}2 = 3{,}5$ m.
e. $a_z(t) = \dfrac{dv_z}{dt} = -g$.
Le vecteur $\vec{a}$ a une direction verticale, un sens vers le bas et une valeur constante : le mouvement est uniformément varié d'accélération $\vec{g}$: c'est une chute libre verticale.

Mouvement dans un champ électrostatique uniforme (§4 du cours)

16. Étudier la force électrique et l'accélération
a. Le champ $\vec{E}$ est uniforme ; il est donc identique en *M* et *N*. Ce champ est orthogonal aux plaques *A* et *B*, son sens est de la plaque portant une charge positive *A* à la plaque *B* et sa valeur est :



$$E = \frac{400}{0{,}10} = 4{,}0 \times 10^3 \text{ V·m}^{-1}.$$

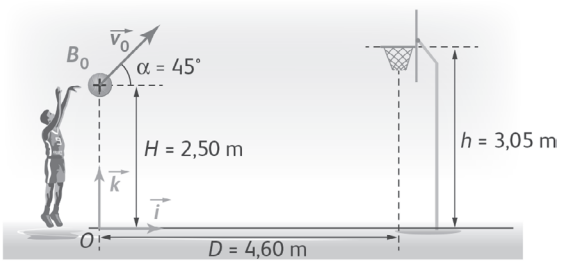
La force qui s'exerce sur un électron est alors $\vec{f_e} = -e\vec{E}$ et elle est identique pour un électron en *M* ou en *N*. La force $\vec{f_e}$ est orthogonale aux plaques *A* et *B*, son sens va de la plaque *B* portant une charge négative à la plaque *A* et sa valeur $f_e = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^3 = 6{,}4 \times 10^{-16}$ N.
b. et c. $\vec{a} = \dfrac{\vec{f_e}}{m}$: l'accélération $\vec{a}$ a donc même direction, même sens que la force électrique et sa valeur est :

$$a = \frac{6{,}4 \times 10^{-16}}{9{,}1 \times 10^{-31}} = 7{,}0 \times 10^{14} \text{ m·s}^{-2}.$$

EXERCICES S'entraîner

17. Exercice résolu dans le manuel

18. Application de l'exercice résolu
1. *Schéma de la situation*



Le système étudié est la balle. Le référentiel choisi est le référentiel terrestre galiléen.
En faisant l'hypothèse que l'action de l'air est négligeable, la balle est soumise à une seule force, son poids.
En appliquant la deuxième loi de Newton pour le ballon considéré comme un solide de masse m constante, assimilable à un point matériel B, on obtient :

$$\vec{a} = \vec{g}$$

d'où dans le repère proposé :

$$a_x = 0$$
$$a_z = -g$$

Par intégration, on obtient les coordonnées du vecteur vitesse :

$$v_x = C_1 = v_0\cos\alpha \quad ; \quad v_z = -gt + C_2$$

soit ici $v_z = -gt + v_0\sin\alpha$.
Par intégration, on établit les coordonnées du vecteur position :
$t_0 = 0$, on a $x = 0$ et $z = H$;
$x = (v_0\cos\alpha)t + C_3$ soit ici $x = (v_0\cos\alpha)t$ car à $t_0 = 0$, on a $x = 0$.

$$z = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0\sin\alpha)t + C_4 \text{ soit ici :}$$

$$z = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0\sin\alpha)t + H \text{ car à } t_0 = 0, \text{ on a } z = H.$$

2. L'équation de la trajectoire du projectile est obtenue en éliminant t entre $x(t)$ et $y(t)$.
On obtient :

$$z = \frac{-gx^2}{2v_0^2\cos^2\alpha} + (\tan\alpha)\,x + H.$$

Pour que le joueur marque un panier, il faut que le ballon arrive au point P de coordonnées :

$$x_P = D \text{ et } z_P = h$$

soit :

$$h = \frac{-gD^2}{2v_0^2\cos^2\alpha} + (\tan\alpha)\,D + H.$$

On en déduit :

$$(\tan\alpha)\,D + H - h = \frac{gD^2}{2v_0^2\cos^2\alpha'}$$

soit : $v_0 = \sqrt{\dfrac{gD^2}{2((\tan\alpha)\,D + H - h)\cos^2\alpha}}$.

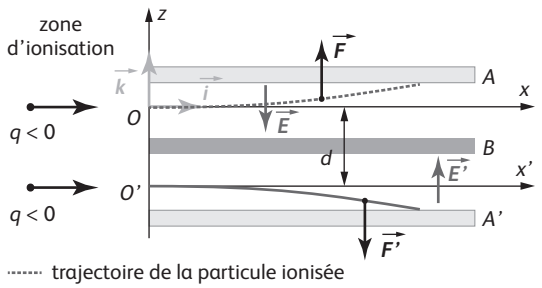
A.N. :

$$v_0 = \sqrt{\frac{9{,}8 \times 4{,}6^2}{2((\tan 45) \times 4{,}6 + 2{,}5 - 3{,}05)\cos^2 45}} = 7{,}2 \text{ m·s}^{-1}.$$

19. Exercice résolu dans le manuel

20. Application de l'exercice résolu

1. *Schéma de la situation*



trajectoire de la particule ionisée

Entre les plaques A et B la particule est déviée vers A donc la force F est orientée de B vers A. La charge q portée par la particule étant négative, on en déduit d'après la relation $F = qE$ que le champ E est orienté de A vers B comme indiqué sur la figure, ainsi que les signes positif de la plaque A et négatif de la plaque B.
2. En négligeant la valeur du poids devant la valeur de la force électrique, d'après la deuxième loi de Newton, l'accélération $\vec{a}$ de la particule chargée est telle que $m\vec{a} = \vec{F}$, soit :

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}.$$

Le champ $\vec{E}$ étant orthogonal aux plaques, comme $\vec{a}$ a le même sens que k car la particule est déviée dans ce sens.
Les coordonnées de $\vec{a}$ sont alors $a_x = 0$ et $a_z = \dfrac{|q|E}{m}$.

3. Pour établir l'équation de la trajectoire, on établit dans un premier temps les coordonnées du vecteur vitesse de l'électron puis les coordonnées du vecteur position.
Par intégration des coordonnées a_x et a_z du vecteur accélération, on obtient les coordonnées v_x et v_z du vecteur vitesse :

$$a_x = 0 \quad \text{et} \quad a_z = \frac{|q|E}{m}$$

$$v_x = C_1 = v_0 \quad \text{et} \quad v_z = \frac{|q|E}{m}t + C_2$$

$$\text{soit } v_z = \frac{|q|E}{m}t$$

$$\text{car à } t_0 = 0,\ v_z(t_0) = 0$$

Par intégration des coordonnées v_x et v_z du vecteur vitesse, on obtient les coordonnées, ou équations horaires, x et z du vecteur position OM :
$v_x = v_0$ donne $x = v_0t + C_3$; avec $C_3 = 0$ car à $t_0 = 0$, $x_0 = 0$.
On obtient : $x = v_0t$.

$$v_z = \frac{|q|E}{m}t \quad \text{donne} \quad z = \frac{|q|E}{2m}t^2 + C_4 ;$$

$$\text{avec } C_4 = \frac{d}{2} \quad \text{car} \quad \text{à } t_0 = 0, \text{ on a } z_0 = \frac{d}{2}.$$

$$\text{On obtient :} \quad z = \frac{|q|E}{2m}t^2 + \frac{d}{2}$$

4. Par rapport à la situation précédente, seul le sens de la force change : les coordonnées du vecteurs accélération sont :

$$a'_x = 0 \quad ; \quad a'_z = \frac{|q|E}{2m} = \frac{|q|E}{m}.$$

On obtient directement les coordonnées x' et z' du vecteur position $O'M'$:

$$x' = v_0t \quad \text{et} \quad z' = \frac{|q|E}{2m}t^2 - \frac{d}{2}.$$

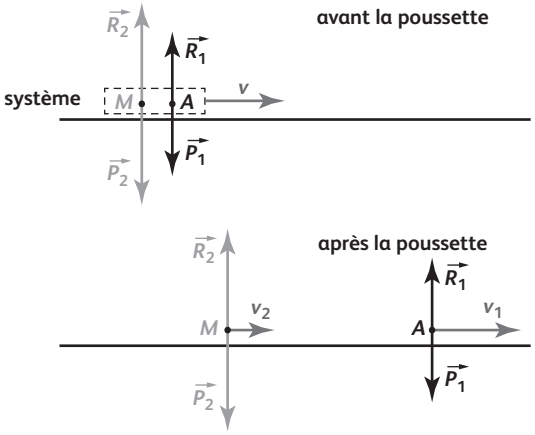
21. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. On choisit le système formé de l'ensemble {Abel + Maxime} et on étudie le mouvement dans le référentiel terrestre.

Le système est soumis à des forces qui se compensent : $(\vec{P}_1 + \vec{R}_1) + (\vec{P}_2 + \vec{R}_2) = \vec{0}$.

Juste avant la poussette, on appelle v la vitesse du système ; juste après la poussette on appelle v_1 et v_2 les vitesses respectives de Abel et Maxime.



D'après le principe d'inertie, le système étant soumis à des forces qui se compensent, il est isolé : la quantité de mouvement du système se conserve.

$$(m_1 + m_2)\vec{v} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2.$$

Cette relation montre que $\vec{v}_2$ a la même direction que $\vec{v}$ et $\vec{v}_1$.

On choisit un axe $(O ; \vec{i})$ de direction la trajectoire, orienté dans le sens du déplacement des deux patineurs.

On obtient alors la relation algébrique :

$$(m_1 + m_2)v_x = m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x}.$$

On en déduit :

$$v_{2x} = \frac{(m_1 + m_2)v_x - m_1 v_{1x}}{m_2}.$$

Soit $v_{2x} = 12$ km·h^{-1}.

On en déduit que Maxime continue à se déplacer dans le même sens mais avec une vitesse plus faible de $v_2 = 12$ km·h^{-1}.

b. On choisit maintenant le système formé de Abel.

Sa quantité de mouvement a varié pendant la poussette de :

$$\Delta\vec{p} = m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{v}.$$

D'après la deuxième loi de Newton, la force $\vec{F}$ qui s'est exercée sur lui pendant la durée Δt de la poussette est :

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}.$$

La valeur moyenne de cette force est de :

$$\vec{F} = \frac{m_1(v_1 - v)}{\Delta t}.$$

Il est indispensable ici d'utiliser les unités SI pour les vitesses ($1\text{km·h}^{-1} = \frac{1\,000}{3\,600}\text{ m·s}^{-1}$).

On obtient :

$$F = \frac{60 \times (26 - 18)\dfrac{1000}{3\,600}}{0{,}5} = 2{,}7 \times 10^2 \text{ N}.$$

c. D'après la troisième loi de Newton, la force exercée par Maxime sur Abel est opposée à la force exercée par Abel sur Maxime. La valeur de la force moyenne exercée par Abel sur Maxime est alors de $F = 2{,}7 \times 10^2$ N.

22. Accélération d'un ion

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. Calcul de la force électrique qui s'exerce sur l'ion : la charge électrique portée par l'ion vaut $q = +2e = 3{,}2 \times 10^{-19}$ C , on en déduit la valeur de la force électrique :

$$f_e = \frac{3{,}2 \times 10^{-19} \times 8{,}0 \times 10^2}{1{,}2} = 2{,}1 \times 10^{-16} \text{ N}.$$

b. Calcul de la masse de la particule : en négligeant la masse des électrons, la masse de l'ion Ne^{2+} est en moyenne (tous isotopes confondus) égale à :

$$\text{masse de l'ion } Ne^{2+} = \frac{\text{masse molaire du néon}}{\text{nombre d'Avogadro}}$$

$$m = \frac{20{,}2 \times 10^{-3}}{6{,}022 \times 10^{23}} = 3{,}35 \times 10^{-26} \text{ kg}.$$

c. On applique la deuxième loi de Newton à un ion Ne^{2+} :

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}_{ext} = \vec{f}_e \text{ soit } \vec{a} = \frac{\vec{f}_e}{m}.$$

La valeur de l'accélération des ions est alors :

$$a = \frac{f_e}{m} = \frac{2{,}1 \times 10^{-16}}{3{,}35 \times 10^{-26}} = 6{,}3 \times 10^9 \text{ m·s}^{-2}.$$

23. Galilée à Pise

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. On choisit la bille comme système et on étudie son mouvement dans le référentiel terrestre considéré galiléen.

Le poids $\vec{P}$ de la bille est la seule force qui s'exerce sur elle.

La deuxième loi de Newton appliquée à la bille devient : $m\vec{a} = \vec{P}$ soit $\vec{a} = \vec{g}$, champ de pesanteur.

Dans le repère $(O, \vec{j})$ défini dans le texte, on obtient $a_y = g$.

On choisit $t_0 = 0$ s, date de lâcher de la bille.

Par intégration, on obtient (la vitesse à la date $t_0 = 0$ s étant nulle) : $v_y = gt$.

Et $y = \frac{1}{2}gt^2$ (la coordonnée y à la date $t_0 = 0$ s étant nulle).

b. Durée de chute jusqu'au sol : au niveau du sol $y_S = h$; on obtient alors la durée de chute

$$t_S = \sqrt{\frac{2h}{g}} \text{ soit } t_S = \sqrt{\frac{2 \times 54}{9{,}8}} = 3{,}3 \text{ s}.$$

c. Vitesse à l'arrivée sur le sol :

$v_s = gt_s$ soit $v_s = 9{,}8 \times 3{,}3 = 33$ m·s^{-1}.

24. De Galilée à Newton

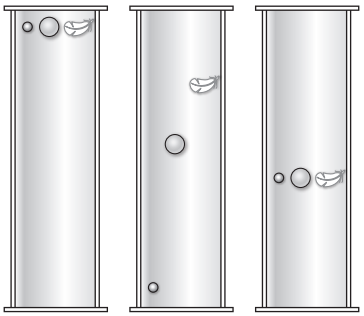
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider, communiquer.**

a. Il faut comprendre que tous les corps auraient la même vitesse (en effet la vitesse ne reste pas constante au cours d'une chute).

b. « Si on éliminait complètement la résistance du milieu » est équivalent à « si on supprimait les forces exercées par l'air sur les corps ».

c. En faisant le vide dans le tube, Newton supprime l'air et donc les interactions entre le corps et l'air.

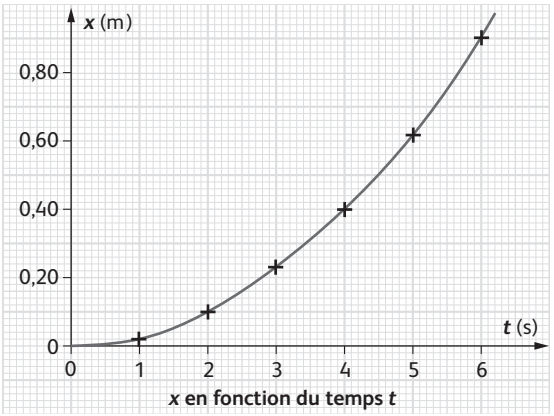
d.



25. Réalisation et exploitation d'un graphique

> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider.**

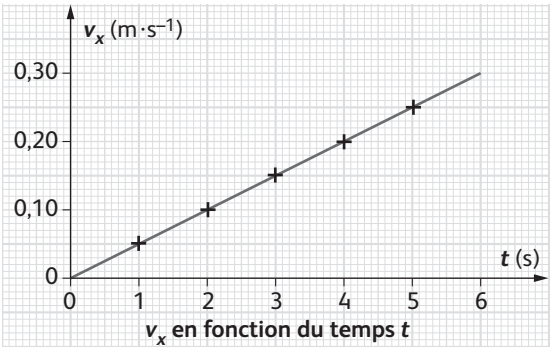
a. La représentation graphique de $x(t)$ a une « allure » de parabole.



b. Pour déterminer les caractéristiques du mouvement, il est nécessaire d'étudier $v_x(t)$.

Avec un tableur on peut calculer les valeurs de v_x comme sur les enregistrements :

$$v_{xi} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$



v_x est une fonction linéaire de t, de coefficient directeur $a_x = 0{,}05$ m·s^{-2}.

c. L'accélération de ce mouvement rectiligne est :

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0{,}05 \text{ m·s}^{-2}.$$

Le mouvement est donc rectiligne uniformément varié, ici il est accéléré.

26. Une voiture au banc d'essai

> COMPÉTENCES : **Analyser, valider.**

Supposons l'accélération constante. Dans un premier temps, on calcule la valeur de l'accélération supposée constante, puis dans un deuxième temps, on calculera la distance qui serait ainsi parcourue par la voiture. La comparaison avec la valeur donnée permettra de conclure.

Soit a_x la coordonnée du vecteur accélération selon l'axe $(O\,;\,i)$ de direction la piste et orienté dans le sens du déplacement du véhicule.

À $t = 0$ s, $v_{x_0} = 0$ et $x_0 = 0$.

À $t = 10{,}0$ s, on a $v_x = \frac{100}{3{,}6} = 27{,}8$ m·s^{-1}.

Par intégration, on obtient $v_x = a_x \times t + v_{x_0}$, soit $v_x = a_x \times t$, soit $a_x = 2{,}78$ m·s^{-2}.

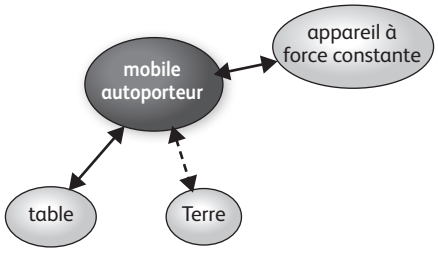
Par intégration, on obtient $x = \frac{1}{2} a_x t^2$.

Quand $t = 10{,}0$ s, on obtient $x = \frac{1}{2} \times 2{,}78 \times 10^2 = 139$ m, soit une distance très inférieure à la valeur indiquée. L'accélération n'a pas été constante pendant l'essai.

27. Masse d'un solide et mouvement

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

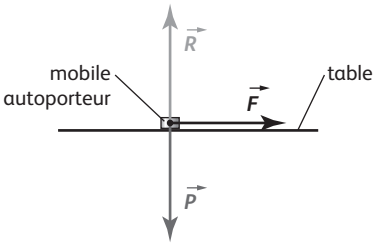
a. Les interactions avec le mobile se font avec la Terre (interaction à distance), la table et le fil de l'appareil à force constante (interactions de contact).



b. L'interaction entre la table et le mobile se fait sans frottement (mobile auto porteur), la force $\vec{R}$ exercée par la table sur le mobile est alors perpendiculaire au plan de la table, elle est donc verticale. L'ensemble des forces a une direction horizontale (mouvement rectiligne du point *A*), la force $\vec{R}$ exercée par la table sur le mobile s'oppose donc au poids $\vec{P}$ et compense celui ci, soit :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$

on a alors : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{F}$.



c. Pour $m = 740$ g :

$v_2 = \dfrac{0{,}034}{0{,}080} = 0{,}43 \text{ m·s}^{-1}$;

$v_4 = \dfrac{0{,}042}{0{,}080} = 0{,}53 \text{ m·s}^{-1}$;

$p_2 = 0{,}74 \times 0{,}425 = 0{,}32 \text{ kg·m·s}^{-1}$;

$p_4 = 0{,}740 \times 0{,}525 = 0{,}39 \text{ kg·m·s}^{-1}$.

Pour $m' = 1470$ g :

$v'_2 = \dfrac{0{,}024}{0{,}080} = 0{,}30 \text{ m·s}^{-1}$;

$v'_4 = \dfrac{0{,}028}{0{,}080} = 0{,}35 \text{ m·s}^{-1}$;

$p'_2 = 0{,}44 \text{ kg·m·s}^{-1}$;

$p'_4 = 0{,}51 \text{ kg·m·s}^{-1}$.

d. Pour $m = 740$ g, on a : $\dfrac{p_4 - p_2}{2\tau} = 0{,}88$.

Pour $m' = 1470$ g, on a : $\dfrac{p'_4 - p'_2}{2\tau} = 0{,}88$.

Dans ces expériences, le mobile est soumis à la même force $\vec{F}$. D'après la deuxième loi de Newton, on doit alors avoir $\dfrac{\vec{p_4} - \vec{p_2}}{2\tau} = \vec{F}$ pour chaque mobile et donc

$\dfrac{p_4 - p_2}{2\tau} = \dfrac{p'_4 - p'_2}{2\tau}$ puisque tous les vecteurs ont même direction et même sens. D'où $F = 0{,}88$ N.

Remarque : des écarts éventuels entre $\dfrac{p'_4 - p'_2}{2\tau} = \dfrac{p'_4 - p'_2}{2\tau}$ sont dus essentiellement aux mesures des longueurs qui sont faites avec une incertitude de l'ordre du millimètre.

28. In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, valider.**

a. La première phrase du texte fait référence à la première loi de Newton : la conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé.

b. La quantité de mouvement de l'ensemble « fusée – gaz » reste constante entre deux instants qui encadrent l'expulsion des gaz. On a alors $\overrightarrow{\Delta p_{\text{fusée}}} = -\overrightarrow{\Delta p_{\text{gaz}}}$. Pour la fusée, la variation de la quantité de mouvement se fait en sens opposé de celle des gaz éjectés : la vitesse de la fusée augmente.

c. Les forces citées sont les deux forces d'interaction entre l'eau et le poisson.

d. Dans l'interaction, les deux forces sont opposées, elles ont donc la même valeur (3e loi de Newton).

La vitre ne semble pas bouger car la masse *m* de la vitre et des supports solidaires de cette vitre étant beaucoup plus grande que celle de la mouche, une force de même valeur *F* provoque une variation de vitesse Δv beaucoup plus faible :

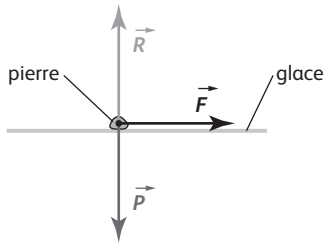
$$F = \frac{m\Delta v}{\Delta t} \quad \text{soit} \quad \Delta v = \frac{F\Delta t}{m}$$

(si *m* est grande alors Δv est petite)

29. ★ Curling : le lancer de pierres

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. La pierre est le système dont on étudie le mouvement dans le référentiel terrestre galiléen.



Dans la phase ①, la pierre est soumise à des forces : son poids $\vec{P}$, la force exercée $\vec{R}$ par la glace et la force $\vec{F}$ exercée par le joueur.

On applique la deuxième loi de Newton pour un solide de masse *m* :

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m\vec{a}$$

Le poids et la force exercée par la glace ont une direction verticale.

Le mouvement de *A* étant rectiligne et selon une droite horizontale, il est donc nul sur l'axe vertical ce qui implique que les forces de direction verticale se compensent. On a :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}.$$

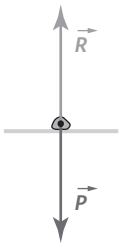
On obtient alors $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}}{m}$: le vecteur accélération est constant, il a la même direction et le même sens que la force $\vec{F}$ et sa valeur est :

$$a = \frac{F}{m}.$$

La pierre a un mouvement rectiligne uniformément accéléré.

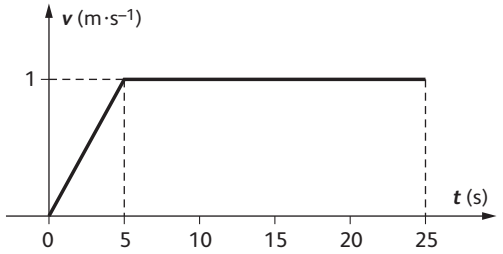
Dans la **phase ②**, la pierre n'est plus soumise à l'action du joueur on a alors :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}.$$



D'après le principe d'inertie, le point matériel A a un mouvement rectiligne uniforme.

b.



Au cours de la phase ②, la pierre conserve la vitesse atteinte en fin de la phase. Cette vitesse est de :

$$v_2 = \frac{D}{\Delta t} = 1 \text{ m·s}^{-1}.$$

On choisit un axe $(O ; \vec{i})$ de direction la trajectoire et de sens celui du déplacement avec une origine $x = 0$ au point de lancement à la date $t_0 = 0$. On appelle t' la date de fin de la phase ①.

$v_{1x} = a_x t$ quand $t = t'$, alors $v_{1x} = v_{2x}$.

Dans la phase ①, la vitesse est une fonction linéaire du temps, dans la phase ②, la vitesse de A reste constante et égale à 1 m·s^{-1}.

c. Nous avons établi que $v_{1x} = a_x t$ avec $a_x = \frac{F}{m}$.

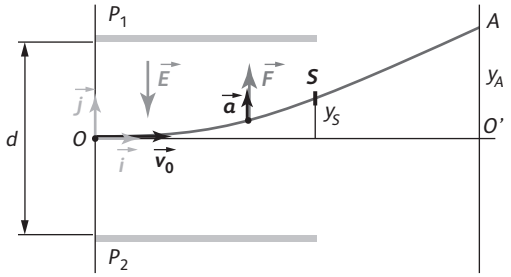
À la fin de la phase ①, on a $v_{1x} = v_{2x}$ soit $v_{2x} = \frac{Ft'}{m}$ on a alors $F = \frac{mv_{2x}}{t'}$.

$v_{2x} = 1$ m·s^{-1} d'où $F = 4$N.

30. ★ Principe de l'oscilloscope

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

1. Le système que l'on étudie est l'électron entre les plaques P_1 et P_2.



Dans le champ électrique, l'électron est soumis à une force électrique $\vec{F} = -e\vec{E}$.

D'après la deuxième loi de Newton, l'accélération $\vec{a}$ de l'électron est telle que $m\vec{a} = \vec{F}$, soit :

$$\vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m}$$

Le champ $\vec{E}$ est orthogonal aux plaques, comme $\vec{a}$ a le même sens que $\vec{j}$ car la particule est déviée dans ce sens, le vecteur $\vec{E}$ est de sens opposé et va donc de P_1 vers P_2.

Les coordonnées de $\vec{a}$ sont alors $a_x = 0$ et $a_y = \frac{eE}{m}$.

2. a. Pour établir l'équation de la trajectoire, on établit dans un premier temps les coordonnées du vecteur vitesse de l'électron puis les coordonnées du vecteur position.

Par intégration :

$a_x = 0$ et $a_y = \frac{eE}{m}$;

$v_x = C_1 = v_0$ et $v_y = \frac{eE}{m}t + C_2$

soit $v_y = \frac{eE}{m}$ car à $t_0 = v_y = 0$.

Par intégration :

$x = v_0 t + C_3$ avec $C_3 = 0$ car à $t_0 = 0$, on a $x_0 = 0$.

On obtient $x = v_0 t$ **(1)** :

$y = \frac{eE}{2m}t^2 + C_4$ avec $C_4 = 0$, car à $t_0 = 0$, on a $y_0 = 0$.

On obtient : $y = \frac{eE}{2m}t^2$ **(2)**.

À partir de l'équation **(1)**, on obtient : $t = \frac{x}{v_0}$.

En reportant cette expression dans **(2)**, on obtient l'équation de la trajectoire de l'électron :

$$y = \frac{eE}{2mv_0^2}x^2.$$

b. Entre O et S, la trajectoire est une courbe d'équation de la forme $y = Ax^2$, c'est donc une portion de parabole d'axe $y'y$.

c. À la sortie S de l'espace entre les plaques, on a $x_S = l^2$

soit $y_S = \frac{eE}{2mv_0^2}l^2$.

Le champ $\vec{E}$ a une valeur qui dépend de la tension U et de la distance d entre les plaques P_1 et P_2 ; soit : $E = \frac{U}{d}$.

En reportant cette expression dans l'expression de y_S ; on obtient :

$y_S = \frac{eU}{2mdv_0^2}l^2$ d'où $y_S = kU$ avec $k = \frac{el^2}{2mdv_0^2}$.

3. a. $y_S = \frac{eE}{2mdv_0^2}l^2$ soit pour $y_A = y_s \times \frac{2L}{l}$

$$y_A = \frac{elL}{mdv_0^2}U.$$

La déviation verticale y_A est proportionnelle à la tension U appliquée entre les plaques.

b. Si U diminue, y_A diminue proportionnellement.

Si U change de signe, le champ $\vec{E}$ change de sens et la déviation change de sens : y_A devient négatif.

31. ★ Ions de l'atmosphère

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. La force électrique qui s'exerce sur un ion positif de charge $q = e$ est :

$$\vec{f_e} = e\vec{E}.$$

On en déduit que $\vec{f_e}$ a même direction et même sens que le champ $\vec{E}$ et sa valeur est $f_e = eE$.
Le champ est vertical et son sens va de l'ionosphère (plaque chargée positivement) vers la Terre (plaque chargée négativement).
b. Le poids de l'ion a pour valeur :

$p = mg$ soit $p = 4{,}8 \times 10^{-26} \times 9{,}8 = 4{,}7 \times 10^{-25}$ N.

La force électrique qui s'exerce sur l'ion a pour valeur :

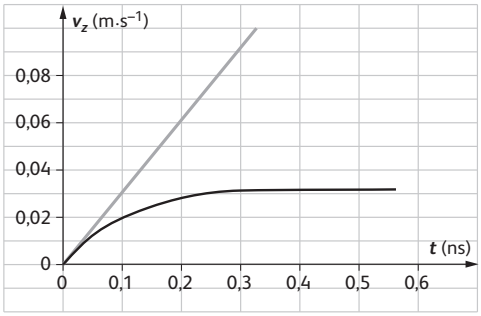
$$f_e = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 1{,}0 \times 10^{2} = 1{,}6 \times 10^{-17} \text{ N}.$$

$$\frac{f_e}{p} = \frac{1{,}6 \times 10^{-17}}{4{,}7 \times 10^{-25}} = 3{,}4 \times 10^{7}.$$

La valeur p du poids est donc environ 30 millions de fois plus faible que la valeur f_e de la force électrique.

c. Si la force électrique $\vec{f_e} = e\vec{E}$ était la seule force qui s'exerçait sur l'ion, celui-ci aurait une accélération $\vec{a} = \frac{e}{m}\vec{E}$; soit une accélération constante, et donc le mouvement de l'ion serait uniformément accéléré.

On aurait : $a_z = \frac{eE}{m}$ et $v_z = a_z t$. v_z serait une fonction linéaire de t.



Dans le cas étudié, la valeur de la vitesse tend très rapidement vers une valeur limite. La particule est donc soumise à des forces qui ne sont pas négligeables devant la force électrique.
d. Quand la valeur limite est atteinte, le mouvement de l'ion est rectiligne uniforme. D'après le principe d'inertie, on a $\vec{F} + \vec{f_e} = \vec{0}$. On a alors $\vec{F} = -\vec{f_e}$.
Proposition : l'atmosphère est constituée de nombreuses molécules et de nombreux ions avec lesquels l'ion étudié peut entrer en interaction. $\vec{F}$ modélise à chaque instant l'ensemble de ces interactions.

32. ★★ S'auto-évaluer

Dans le référentiel terrestre, on choisit un repère orthonormé $\{O ; \vec{i}, \vec{k}\}$ dans le plan vertical de B_0 et S_0.
On établit les équations du mouvement de chute libre des points matériels B et S d'accélération $\vec{a} = \vec{g}$.
L'ordonnée de B_0 est h, celle de S_0 est H.

Pour B	Pour S
$a_{Bx} = 0$ et $a_{Bz} = -g$	$a_{Sx} = 0$ et $a_{Sz} = -g$
$v_{Bx} = v_0 \cos\alpha$ et $v_{Bz} = -gt + v_0 \sin\alpha$	$v_{Sx} = 0$ et $v_{Sz} = -gt$
$x_B = (v_0 \cos\alpha)t$ et	$x_S = d$
$y_B = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t + h$	et $y_S = -\frac{1}{2}gt^2 + H$

(1) S et B se rencontrent s'il existe une date t pour laquelle on a simultanément :

$$x_B = x_S \quad \text{et} \quad y_B = y_S.$$

(2) S et B se rencontrent avant d'arriver sur le sol si pour cette date t, on a :

$$y_B \text{ ou } y_S > 0.$$

Conditions (1) : quand $x_B = x_S$; on déduit $t = \frac{d}{v_0 \cos\alpha}$.

De $y_B = y_S$, on déduit $-\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t + h = -\frac{1}{2}gt^2 + H$ soit :

$\frac{(v_0 \cos\alpha)d}{v_0 \cos\alpha} + h = H$ soit $d \tan\alpha = H - h$.

Avec les données géométriques de la situation, on trouve :

$$\tan\alpha = \frac{H - h}{d}.$$

Les conditions **(1)** sont donc toujours réalisées : B et S se rencontrent toujours si la condition **(2)** est réalisée.

Condition **(2)** : $y_S > 0$ amène à $y_S = -\frac{1}{2}gt^2 + H > 0$ soit $-\frac{1}{2}g\left(\frac{d}{v_0 \cos\alpha}\right)^2 + H > 0$.

On exprime v_0 en fonction des autres données de l'inégalité précédente :

$-\frac{1}{2}g\left(\frac{d}{v_0 \cos\alpha}\right)^2 > -H$ soit

$H > \frac{1}{2}g\left(\frac{d}{v_0 \cos\alpha}\right)^2$

d'où $v_0^2 > \frac{gd^2}{2H\cos^2\alpha}$

or, $\cos\alpha = \frac{d}{d^2 + (H-h)^2}$ ce qui implique

$v_0^2 > \frac{g(d^2 + (H-h)^2)}{2H}$ soit au final :

$v_0 > \sqrt{\frac{g(d^2 + (H-h)^2)}{2H}}$

A.N. :

$v_0 > \sqrt{\frac{9{,}81 \times (5{,}1 - 1{,}3)^2}{2 \times 5{,}1}} = 6{,}4$ m·s^{-1}.

Il existe donc une vitesse limite de lancement de la balle pour qu'elle atteigne le singe pendant sa chute : cette vitesse doit être supérieure à 6,4 m·s^{-1}.

33. ★★ Flèche et portée

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. Coordonnées du vecteur vitesse à $t_0 = 0$s :

$$v_{0x} = v_0 \cos\alpha ; v_{0z} = v_0 \sin\alpha$$

b. Le système étudié est la balle. Le référentiel choisi est le référentiel terrestre galiléen.
La balle est soumise à une seule force, son poids. En appliquant la deuxième loi de Newton pour un solide de masse m constante on obtient :

$$\vec{a} = \vec{g}$$

d'où dans le repère proposé :

$$a_x = 0 \text{ et } a_z = -g$$

c. Par intégration, on obtient les coordonnées du vecteur vitesse :

$v_x = C_1 = v_0 \cos\alpha$

$v_z = -gt + C_2$ soit ici $v_z = -gt + v_0 \sin\alpha$

d. Par intégration, on établit les coordonnées du vecteur position :

$t_0 = 0$, on a $x = 0$ et $z = 0$

$x = (v_0 \cos\alpha)t + C_3$ soit ici $x = (v_0 \cos\alpha)t$ car à $t_0 = 0$, on a $x = 0$.

$z = -\frac{1}{2} gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t + C_4$ soit ici $z = \frac{1}{2} gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t$ car à $t_0 = 0$, on a $z = 0$.

L'équation de la trajectoire du projectile est obtenue en éliminant t entre $x(t)$ et $y(t)$.

On obtient :

$$z = \frac{-gx^2}{2v_0^2 \cos^2\alpha} + (\tan\alpha)x$$

e. La vitesse en S ne peut être nulle, car quelle que soit sa position, la balle garde une même vitesse de déplacement horizontale $v_x = v_0 \cos\alpha$.

f. Au point S, le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire :

$$v_{S_z} = 0 \quad \text{soit} \quad -gt_S + v_0 \sin\alpha = 0$$

On déduit :

$$t_S = \frac{v_0 \sin\alpha}{g}$$

d'où :

$$z_S = -\frac{1}{2} g \left(\frac{v_0 \sin\alpha}{g}\right)^2 + (v_0 \sin\alpha)\left(\frac{v_0 \sin\alpha}{g}\right) = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$$

La flèche vaut donc :

$$z_S = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}.$$

g. La portée du tir correspond à la valeur de la distance OI soit à x_I (abscisse du point d'impact I).

Au point I, on a $z_I = 0$, soit :

$$\frac{-gx^2}{2v_0^2 \cos^2\alpha} + (\tan\alpha)x_1 = 0 \text{ pour } x \neq 0.$$

On déduit la portée du tir :

$$x_I = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

h. Calcul de la flèche et de la portée.

flèche : $y_S = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g} = 4{,}1$ m.

portée : $x_I = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} = 29$ m.

i. *La simulation est à disposition sur les sites compagnon Sirius.*

Avec la simulation on retrouve ces valeurs :

– Deux tirs ayant la même vitesse de lancement ont la même portée lorsque les angles de tir sont complémentaires.

– La portée est maximale lorsque l'angle de tir est de 45°.

Remarque : ces résultats peuvent être établis à partir des expressions de y_S et de x_I.

Même portée pour un angle de tir de α et $\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$:

$\sin 2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \sin(\pi - 2\alpha) = \sin 2\alpha$.

On a dans les deux cas une même portée : $x_I = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

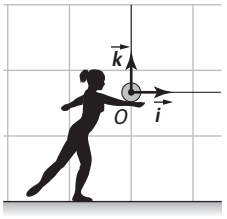
Portée maximale pour $\alpha = 45°$:

x_I est maximum pour $\sin 2\alpha = 1$ soit pour $2\alpha = \frac{\pi}{2}$ soit $\alpha = \frac{\pi}{4}$ rad $= 45°$.

34. ★★ Lancer de ballon en GRS

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a.



Dans le référentiel lié à la gymnaste, le ballon est lancé verticalement avec une vitesse v.

Dans le référentiel terrestre, la vitesse de lancement a deux composantes :

– l'une horizontale de valeur V ;

– l'autre verticale de valeur v.

Écrivons les équations horaires du centre du ballon et de la main de la gymnaste dans le référentiel terrestre.

On choisit un repère $(O ; \vec{i}, \vec{j})$ dans le plan de déplacement du ballon et de la gymnaste, l'origine O étant la position du point de lancement du ballon et $t_0 = 0$ s la date du lancement.

Pour la gymnaste qui a un mouvement rectiligne uniforme de vitesse V, l'équation de son déplacement est :

$$x_G = V \times t.$$

Pour le ballon, en mouvement de chute libre, son accélération est $\vec{a} = \vec{g}$ d'où dans le repère proposé :

$$a_x = 0 \text{ et } a_z = -g.$$

Par intégration, on obtient les coordonnées du vecteur vitesse :

$$v_x = V \text{ et } v_z = -g \times t + v$$

Par intégration, on établit les coordonnées du vecteur position du ballon :

$$x_B = V \times t \text{ et } z_B = -\frac{1}{2} gt^2 + v \times t.$$

On note qu'à chaque instant t on a :

$$x_G = x_B = V \times t.$$

La gymnaste récupèrera donc toujours le ballon si elle garde une vitesse constante car elle est toujours sur la même verticale que le ballon (choisir dans la simulation le référentiel lié à la gymnaste).

Par contre, suivant la vitesse verticale de lancement, le ballon montera plus ou moins haut au-dessus d'elle.

b. En donnant différentes valeurs à v et V, on retrouve bien ce résultat en utilisant la simulation (fichier IP) de l'exercice 34 disponible sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

35. Accélérateurs de particules

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer**.

Nous avons choisi de faire travailler les élèves sur deux grands instruments scientifiques que sont le LHC (Large Hadron Collider) et le synchrotron SOLEIL avec comme objectif premier d'aborder des réalisations scientifiques de portée internationale dont les mises en œuvre et résultats sont cités dans l'actualité.
Le deuxième objectif est bien sûr d'aider les élèves à structurer des informations pour réaliser une synthèse. Bien que dans les exercices traditionnels de synthèse, les documents soient des textes, nous avons ici intégré des animations qui sont, a priori, d'un abord plus facile que les textes de vulgarisation scientifique concernant le principe de ces deux instruments.
Remarque : l'animation concernant le LHC est commentée en anglais mais elle est sous-titrée en français.
Les questions posées permettent de structurer la synthèse en trois parties :
1. Rôle des champs électriques et magnétiques dans le mouvement des particules.
2. Points communs et différences entre les deux instruments.
3. Exemples d'applications en recherche fondamentale et appliquée.
Nous donnons ci-dessous quelques pistes concernant chacune de ces parties :

1. Rôle des champs électriques et magnétiques dans le mouvement des particules

D'après les deux animations :
– le champ électrique permet d'accélérer des électrons (Soleil) ou des protons (LHC) dans un accélérateur linéaire (LINAC), puis d'augmenter leur énergie (boosters, boucle du LHC) ;
– le champ magnétique a pour rôle de courber ou de maintenir la courbure de la trajectoire des particules chargées (boosters, anneaux de stockage, LHC).

2. Points communs et différences entre les deux instruments

Points communs :
– le LHC et le synchrotron SOLEIL sont les deux grands équipements qui utilisent l'énergie de faisceaux de particules pour la recherche fondamentale ;
– ces deux instruments possèdent accélérateurs de particules et larges boucles dans lesquelles circulent les faisceaux de particules chargées ;
– les particules circulant dans ces instruments ont des vitesses proches de celle de la lumière.
Différences :
– les particules sont différentes : électrons dans le synchrotron Soleil, protons dans le LHC ;
– les expériences sont également différentes : dans le LHC (Large Hadron Collider), ce sont les particules émises lors de chocs entre protons de très haute énergie qui sont étudiées ;
– dans SOLEIL, ce sont les interactions entre le rayonnement synchrotron (rayonnement lumineux très intense) et l'échantillon de matière qui permettent d'étudier les propriétés de celle-ci ;
– les objectifs scientifiques diffèrent également pour ces deux instruments.
Pour SOLEIL, ce sont les structures et propriétés de la matière qui sont explorées avec le rayonnement synchrotron. Pour le LHC, les recherches concernent la physique théorique.

3. Exemples d'applications en recherche fondamentale et appliquée

– pour le LHC : découverte du boson de Higgs, nature de la matière noire, antimatière, recherches sur les premiers instants de l'Univers (le Big Bang) – tests de théories physique ;
– pour SOLEIL : les domaines d'application sont en physique, médecine et biologie, chimie, etc.

EXERCICES Objectif BAC

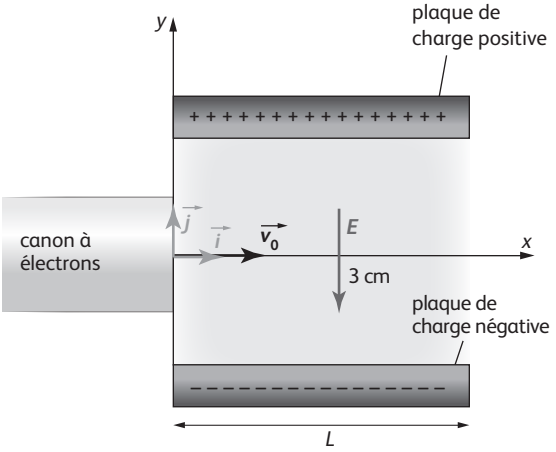
Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

36. Détermination du rapport $\frac{e}{m}$ pour l'électron

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider**.

1. Détermination du caractère négatif de la charge de l'électron par J. J. Thomson

a. D'après l'échelle de 1,0 cm pour 5,0 kV·m^{-1}, et comme E = 15,0 kV·m^{-1}, on en déduit que $\vec{E}$ sera représenté par une flèche de 3,0 cm.



b. D'après la loi de Coulomb, des particules de charges opposées s'attirent. Le faisceau d'électrons étant attiré par la plaque chargée positivement, c'est que les électrons sont porteurs d'une charge négative.
c. $\vec{F} = -e \times \vec{E}$

Entre les plaques, l'électron n'est soumis qu'à la force électrostatique qui le dévie vers la plaque chargée positivement (le poids de l'électron est négligeable devant la force électrique). Cette force est donc de sens opposé au champ électrostatique, et comme $\vec{F} = q \times \vec{E}$, cela impose que $q < 0$.

2. Accélération de la particule électron

On applique la deuxième loi de Newton au système électron, dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{dm \times v}{dt} \times \frac{dm}{dt} \times \vec{v} + m \times \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ comme } m = \text{Cte}$$

alors $\frac{dm}{dt} = 0$ et il vient $\vec{F} = m \times \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}$

soit $-e \times \vec{E} = m \times \vec{a}$ d'où $\vec{a} = \frac{-e \times \vec{E}}{m}$

Le vecteur accélération est de sens opposé au vecteur champ $\vec{E}$.

Par projection suivant les axes du repère défini dans le Document 2, on obtient :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \dfrac{e \times E}{m} \end{cases}$$

3. Détermination du rapport $\frac{e}{m}$ pour l'électron

a. En $x = L$ on a $y(x) = h$

soit : $h = \frac{e \times E}{2 \times m \times v_0^2} \times L^2$

d'où : $\frac{e}{m} = \frac{2 \times v_0^2 \times h}{E \times L^2}$.

b. A.N. :

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \times (2{,}27 \times 10^7) \times 1{,}85 \times 10^{-2}}{15{,}0 \times 10^3 \times 8{,}50 \times 10^{-2})^2}$$

$= 1{,}76 \times 10^{11}$ C·kg^{-1}.

c.

$$U\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{e}{m} \times \sqrt{\left[\left(\frac{U(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{U(E)}{E}\right)^2 + 4\left(\frac{U(v_0)}{v_0}\right)^2 + 4\left(\frac{U(L)}{L}\right)\right]^2}$$

$$U\left(\frac{e}{m}\right) = 1{,}76 \times 10^{11} \times \sqrt{\left[\left(\frac{0{,}05}{1{,}85}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{15{,}0}\right)^2 + 4\left(\frac{0{,}02}{2{,}27}\right)^2 + 4\left(\frac{0{,}05}{8{,}50}\right)^2\right]}$$

$U\left(\frac{e}{m}\right) = 6 \times 10^9$ C·kg^{-1} $= 0{,}06 \times 10^{11}$ C·kg^{-1}.

On ne conserve qu'un seul chiffre significatif pour l'incertitude.

On en déduit : $\frac{e}{m} = (1{,}76 \pm 0{,}06) \times 10^{11}$ C·kg^{-1}.

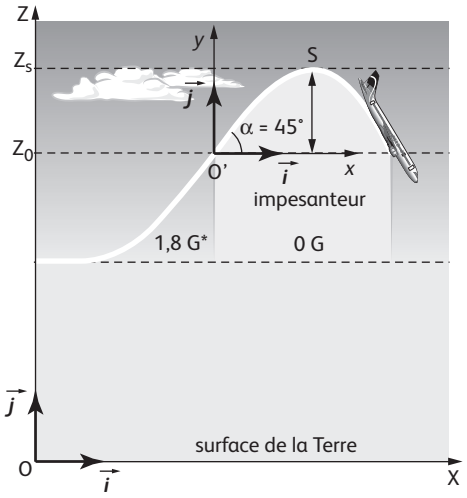
37. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Vol Zéro-G

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, valider, communiquer**.

• Le **Document 1** précise que l'avion est en chute libre dans le référentiel terrestre, c'est à dire « *lorsque la seule force qui s'exerce sur lui est le poids* ».

• Les données du **Document 2** sont relatives au référentiel terrestre avec un repère associé $(O, \vec{i}, \vec{j})$ dont l'origine est prise sur la surface de la Terre. Dans ce référentiel, la trajectoire est parabolique et on peut la représenter comme ci-dessous :



Dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$, l'altitude au départ et à la fin de la parabole est notée $Z_o = 7600$ m et l'altitude au sommet S de la parabole est notée $Z_s = 8200$ m. La valeur v_0 de la vitesse initiale est 527 km·h^{-1} soit 146 m·s^{-1}. Cette vitesse fait un angle $\alpha = 47°$ par rapport à l'horizontale comme indiqué sur le schéma. La vitesse au sommet de la parabole, atteinte au bout de $t_s = \frac{22}{2} = 11$ s, est de direction horizontale et sa valeur v_S est de 355 km·h^{-1} soit 98,6 m·s^{-1}.

• Pour simplifier la résolution du problème, on choisit de prendre un nouveau repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$ avec origine au point de départ de la trajectoire parabolique. Dans ce nouveau repère, l'altitude de départ est $z_o = 0$ m et l'altitude au sommet S de la parabole est notée :

$$z_s = 8\,200 - 7\,600 \text{ m} = 600 \text{ m}.$$

Le but de la résolution de problème est de vérifier la cohérence des données avec une trajectoire de type parabolique dans le champ de pesanteur terrestre, c'est à dire la trajectoire représentative d'un mouvement de chute libre avec une vitesse initiale faisant un angle de 47° par rapport à l'horizontale et de valeur $v_0 = 146$ m·s^{-1}. Ainsi, il faut vérifier que pour la vitesse v_0, l'altitude maximale atteinte vaut $z_s = 600$ m, que la date associée à cette altitude vaut $t_s = 11$ s et que la valeur de la vitesse au sommet de la parabole vaut $v_S = 98{,}6$ m·s^{-1}.

Pour résoudre ce problème, il faut obtenir les coordonnées du vecteur vitesse en fonction du temps ainsi que les équations horaires du mouvement :

– Les coordonnées du vecteur vitesse à $t_0 = 0$ s :

$$v_{0x} = v_0\cos\alpha \text{ et } v_{0z} = v_0\sin\alpha.$$

– Le système étudié est l'avion ramené à son centre d'inertie. Le référentiel choisi est le référentiel terrestre galiléen.

L'avion est soumis à une seule force, son poids. En appliquant la deuxième loi de Newton pour un solide de masse *m* constante, on obtient :

$$\vec{a} = \vec{g}$$

D'où dans le repère proposé :

$$a_x = 0 \text{ et } a_z = -g.$$

– Par intégration, on obtient les coordonnées du vecteur vitesse :

$v_x(t) = C_1 = v_0\cos\alpha$; $v_z(t) = -gt + C_2$

soit ici $v_z(t) = -gt + v_0\sin\alpha$

v_z est nulle au sommet, on doit donc avoir :

$$-gt_S + v_0\sin\alpha = 0$$

On déduit :

$$t_S = \frac{v_0\sin\alpha}{g}$$

A.N. :

$$t_S = \frac{146 \times \sin 47^\circ}{9{,}8} = 11 \text{ s} ;$$

ce qui correspond bien à la moitié de la durée totale du vol parabolique.

De plus la valeur de la vitesse verticale au sommet étant nulle, la valeur de la vitesse au sommet est égale à $v_x = v_0\cos\alpha$. On a donc $v_S = v_0\cos\alpha$.

A.N. :

$v_S = 146 \times \cos 47^\circ = 1{,}0 \times 10^2$ m·s^{-1}, ce qui est bien cohérent avec la valeur de v_S donnée dans le document 2 :

$$v_S = \frac{355}{3{,}6} = 98{,}6 \text{ m·s}^{-1}$$

soit $1{,}0 \times 10^2$ m·s^{-1} avec 2 chiffres significatifs.

– Par intégration, on établit les coordonnées du vecteur position ou équations horaires du mouvement :

$t_0 = 0$, on a $x = x_o = 0$ et $z = z_o = 0$

$x(t) = (v_0\cos\alpha)t + C_3$, soit ici :

$x(t) = (v_0\cos\alpha)t$ car à $t_0 = 0$, on a $x = 0$.

$z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0\sin\alpha)t + C_4$ soit ici :

$z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0\sin\alpha)t$ car à $t_0 = 0$, on a $z = 0$.

Au sommet de la trajectoire, on a :

$$z_S = -\frac{1}{2}gt_S^2 + (v_0\sin\alpha)t_S.$$

A.N. :

$$z_S = -\frac{1}{2}9{,}8 \times 11^2 + (146 \times \sin 47^\circ) \times 11 = 6{,}0 \times 10^2 \text{ m},$$

ce qui est bien cohérent avec la valeur de z_S = 600 m calculée à partir des données du document 2 et exprimée avec 2 chiffres significatifs.

38. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Décollage d'une fusée

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

CHAPITRE 9

COMPRENDRE

Mouvements des satellites et planètes

> Manuel pages 196 à 219

Choix pédagogiques

Ce troisième chapitre du thème « Comprendre » traite principalement des mouvements des satellites et des planètes. L'étude cinématique des mouvements circulaires n'ayant pas été encore menée, la première partie du cours lui est consacrée. Les mouvements circulaires, uniformes ou non, y sont décrits et les caractéristiques du vecteur accélération sont données dans chacun des cas.

Il s'agit d'apporter les éléments nécessaires à l'étude dynamique des mouvements de satellites et planètes menée dans la deuxième partie. Celle-ci propose une démonstration, dans l'approximation des trajectoires circulaires, du caractère uniforme du mouvement d'un satellite et établit l'expression de la vitesse et de la période de celui-ci. Le choix d'utiliser le repère de Frenet a été pris dans le but de respecter les méthodes proposées dans les chapitres précédents, notamment la projection dans un repère de la relation vectorielle qui découle de l'application de la deuxième loi de Newton, afin de résoudre le problème posé.

L'énoncé des lois empiriques de Kepler fait l'objet de la troisième partie. La loi des périodes y est expliquée à partir des relations de la partie précédente et exploitée dans l'approximation des trajectoires circulaires.

Le programme de T^{erm}S n'indique pas de compétences expérimentales exigibles en relation directe avec ce chapitre. Les activités expérimentales proposées permettent néanmoins de saisir ce que représente un vecteur accélération et de mobiliser les autres compétences exigibles formulées dans le programme et relatives à ce chapitre. Elles peuvent constituer un point d'entrée de chacune des parties du cours ou être mise en œuvre a posteriori.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Vue d'artiste de la sonde spatiale Rosetta lancée en mars 2004 par la fusée Ariane 5. Rosetta est restée en orbite autour de la comète Tchouri entre août 2014 et septembre 2016.

Comment pouvait-on définir la trajectoire de Rosetta lorsqu'elle était en orbite autour de la comète Tchouri ?

La photographie est un montage réalisé à partir d'une vraie photographie de la comète Tchouri prise par la sonde Rosetta et d'un dessin d'artiste de la sonde. Elle illustre le mouvement des satellites. La question posée renvoie à la première loi de Kepler étudiée dans ce chapitre : les trajectoires fermées des satellites sont généralement elliptiques, parfois circulaires.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Étudier un mouvement circulaire

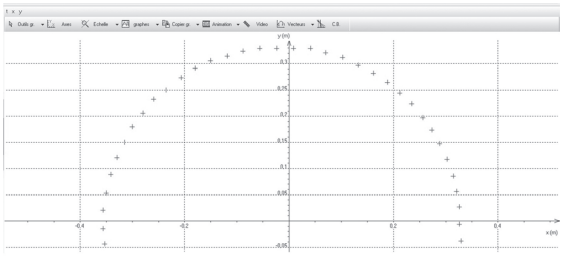
Commentaires

Cette activité propose d'exploiter un enregistrement vidéo pour vérifier l'uniformité du mouvement d'un point filmé et les caractéristiques du vecteur accélération de ce point, déduite des coordonnées données dans la base de Frenet. Sur la vidéo, l'échelle est donnée par le triple décimètre : 30 cm entre les deux marques blanches.

Réponses

RÉALISER

2. a. Le fichier obtenu est issu de la vidéo fournie sur le site sirius.nathan.fr/sirius2017, vidéo réalisée en situation de classe. Le traitement est effectué avec *Regavi* puis *Regressi*.



Les points obtenus sont pratiquement équidistants, le mouvement est donc probablement uniforme.

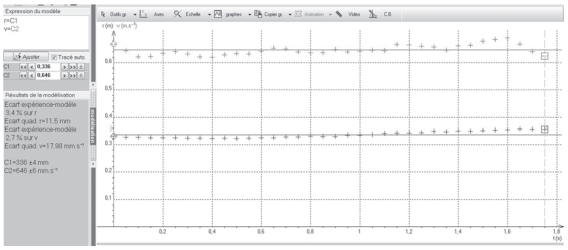
b. La grandeur r est créée à partir des coordonnées x et y :

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ (ou $r = \text{sqrt}(x^2 + y^2)$)

Ensuite, il faut créer les grandeurs :

$v_x = \dfrac{dx}{dt}$ et $v_y = \dfrac{dy}{dt}$ = puis $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ (ou $\text{sqrt}(v_x^2 + v_y^2)$)

Les résultats pour r et v en fonction du temps sont affichés ci-après.



L'écart relatif expérience-modèle ($r = C_1$) est faible (inférieur à 5 %). r est bien constant. Le mouvement est circulaire.

$r = 33{,}6 \pm 0{,}4$ cm d'après le logiciel, ce qui correspond à la valeur de $34{,}0 \pm 0{,}3$ cm que l'on peut mesurer à l'aide d'un réglet gradué en cm (incertitude-type $s = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0{,}288$ cm arrondie à 0,3 cm) : 1,2 % d'écart seulement sépare les deux valeurs et les intervalles de mesures se chevauchent.

c. Concernant la vitesse, l'écart relatif expérience-modèle ($v = C_2$) est faible (inférieur à 5 %). La valeur v de la vitesse peut-être considérée comme constante et le mouvement uniforme.

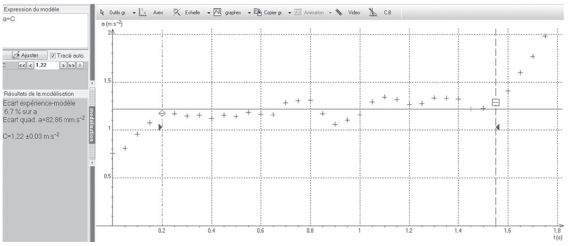
$$v = 646 \pm 6 \text{ mm·s}^{-1}$$

d. Concernant l'accélération, l'écart relatif expérience-modèle ($a = C$) est plus important. Il nous faut réduire le domaine d'étude pour minimiser les erreurs de calculs de dérivées sur les premières et dernières valeurs initiales.

L'écart est alors de 6,7 %.

e. Compte tenu des erreurs de pointage et de calculs de dérivées enchaînés, on peut considérer que la valeur de l'accélération est constante.

$$a = 1{,}22 \pm 0{,}03 \text{ m·s}^{-2}$$



ANALYSER

3. Le mouvement est qualifié de circulaire uniforme car la trajectoire d'un point est un cercle et que la valeur de sa vitesse est constante.

VALIDER

4. a. Dans le cas d'un mouvement uniforme :

$v = \text{cte} \Rightarrow a_t = \frac{dv}{dt} = 0$;

$a_n = \frac{v^2}{r}$ reste constant.

b. Si ces propriétés sont vérifiées :

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{0 + a_n^2} = a_n$$

En utilisant les valeurs de v et r déterminées à l'aide du logiciel, on peut calculer a_n.

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{0{,}646^2}{0{,}336} = 1{,}24 \text{ m·s}^{-2}.$$

On retrouve la valeur de a à 2 % près. Les valeurs de a et a_n peuvent être considérées comme égales, constantes et a_t nulle.

2. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Étude de l'accélération d'un mouvement circulaire uniforme

Commentaires

Lors de cette démarche d'investigation, l'élève construit graphiquement le vecteur accélération d'un point en mouvement circulaire uniforme. Il est ainsi amené à :

– comprendre qu'une accélération peut-être non nulle même si un mouvement est uniforme ;

– vérifier les caractéristiques du vecteur accélération dans le cas particulier, mais important pour la suite de l'étude d'un mouvement circulaire uniforme. Ces caractéristiques (point d'application, direction, sens et valeur) étant énoncées dans le cours sans démonstration, la vérification par construction graphique facilite la compréhension, et donc la connaissance, de celles–ci.

Réponses

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

3. SIMULATION
Satellite en orbite circulaire

Commentaires

L'objectif de cette activité est de mettre en évidence le caractère uniforme du mouvement d'un satellite en orbite circulaire, de réinvestir les lois de Newton (deuxième loi et loi d'interaction gravitationnelle) pour lui donner une explication et déterminer l'influence de la valeur du rayon r de l'orbite sur celle de la vitesse d'un satellite en orbite circulaire.

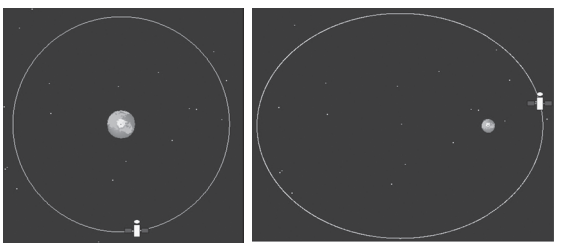
Cette activité peut également donner l'occasion d'expliquer comment construire simplement une ellipse (méthode du jardinier) et d'introduire les termes de foyers et de grand axe pour préparer l'énoncé des lois de Kepler.

Réponses

ANALYSER

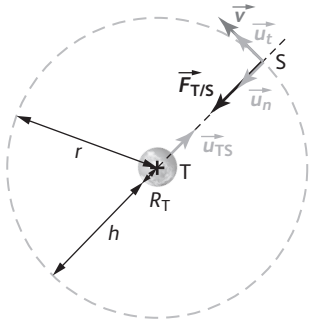
2. a.

Cas 1 **Cas 2**



Le mouvement est circulaire dans le cas 1. La valeur de la vitesse est constante : le mouvement est uniforme.
b. Dans le cas d'une orbite elliptique (cas 2), la valeur de la vitesse n'est pas constante : le mouvement n'est pas uniforme. La valeur de la vitesse est minimale lorsque le satellite et au plus loin de la Terre (apogée de se trajectoire), elle est maximale lorsqu'il est au plus près (périgée).

VALIDER
4. a. Dans le premier cas, le mouvement est circulaire. Calculons la valeur de la vitesse avec l'expression proposée.



$$v = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}} = \sqrt{\frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24}}{42\,000 \times 10^3}}$$

$= 3{,}8 \times 10^3 \text{ m·s}^{-1} = 3{,}08 \text{ km·s}^{-1}$

Pour obtenir un mouvement circulaire dans le deuxième cas sans modifier la vitesse initiale, il faut choisir $h_0 = 23\,550$ km soit $r_0 = 29{,}9 \times 10^3$ km. Le mouvement est uniforme dans ce cas.
Calculons la valeur de la vitesse :

$$v = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}} = \sqrt{\frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24}}{29{,}9 \times 10^6}}$$

$= 3{,}65 \times 10^3 \text{ m·s}^{-1} = 3{,}65 \text{ km·s}^{-1}$.

Dans les deux cas, la valeur théorique et la valeur expérimentale sont en bon accord.
b. Le satellite S étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\overrightarrow{F_{T/S}} = -G\frac{m_S M_T}{r^2}\overrightarrow{u_{TS}}$$

avec $\overrightarrow{u_{TS}}$ vecteur unitaire de direction (TS) orienté de T vers S (voir figure **4. a.**).
En considérant que m est constante, l'application de la deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\overrightarrow{F_{T/S}} = m \times \vec{a} \text{ soit } \vec{a} = -G\frac{M_T}{r^2}\overrightarrow{u_{TS}} = G\frac{M_T}{r^2}\overrightarrow{u_n}$$

En valeur : $a = G\dfrac{M_T}{r^2} = G\dfrac{M_T}{(R_T + h)^2}$.

D'après l'énoncé : $a = \dfrac{v^2}{R_T + h}$.

On en déduit : $G\dfrac{M_T}{(R_T + h)^2} = \dfrac{v^2}{(R_T + h)}$.

Soit, après simplification : $v = \sqrt{\dfrac{GM_T}{R_T + h}}$.

COMMUNIQUER
5. Le mouvement du satellite est nécessairement uniforme s'il est circulaire.
Pour obtenir un mouvement circulaire, il faut que la direction du vecteur vitesse initial soit perpendiculaire à la direction Terre-satellite et que la valeur de la vitesse soit égale à la valeur calculée par la relation $v = \sqrt{\dfrac{GM_T}{R_T + h}}$
h étant l'altitude du satellite.

4. SIMULATION
Pesée de Jupiter

Commentaires
À partir d'observations de qualité faites à l'aide du logiciel *Stellarium*, cette activité permet d'exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas des quatre satellites « galiléens » de Jupiter pour déterminer la masse de cet astre.
Un tutoriel du logiciel, adapté à cette simulation, est proposé ci-dessous.

Manipulation souhaitée	Opération permettant de la réaliser
Rechercher un astre	Taper sur la touche F3 ou cliquer sur l'icône de fenêtre de recherche (disponible dans la barre de menu qui peut être masquée) :  Remarque : pour suivre la planète sous l'horizon, l'icône « sol »  doit être éteinte :  Cliquer dessus ou appuyer sur G
Faire apparaître le nom des planètes	Cliquer sur l'icône  afin qu'elle soit allumée
Augmenter ou diminer le grossissement	Tourner la mollette de la souris
Choisir une monture équatoriale	Cliquer sur l'icône  afin qu'elle soit allumée
Avancer dans le temps	Appuyer sur la touche de raccourcis clavier « l ». Répéter l'opération pour augmenter la vitesse de défilement
Arrêter l'avancement dans le temps	Appuyer sur la touche « k »
Reculer dans le temps	Appuyer sur la touche « j »
Revenir à la date de début de l'expérience	Appuyer sur touche « 8 »

Réponses

RÉALISER

1. d. Exemple de résultats dans le cadre de l'activité proposée :
Distance Jupiter-Terre au moment de la visée :
$D = 4{,}19946$ u.a ;
Champ de vision : $\theta = 0{,}183°$.

e. La période des satellites est indiquée dans le tableau qui est complété au cours des questions suivantes.
$T = t_2 - t_1$.

Nom du satellite	*d*	*T(s)*	α (°)	*r*
Io	0,0430	$1{,}525 \times 10^5$	0,03747	$4{,}109 \times 10^8$
Europe	0,0620	$3{,}065 \times 10^5$	0,05403	$5{,}924 \times 10^8$
Ganymède	0,1020	$6{,}172 \times 10^5$	0,08889	$9{,}746 \times 10^8$
Callisto	0,1720	$1{,}272 \times 10^6$	0,1499	$1{,}643 \times 10^9$

f. Voir première colonne du tableau précédent.

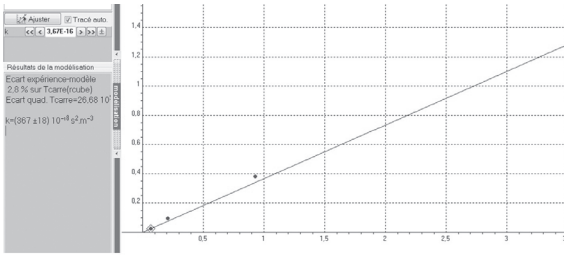
g. $L = 21{,}0$ cm.

2. a. $\alpha = \dfrac{\theta d}{L} = \dfrac{0{,}183 \times d}{0{,}21}$.

Résultats reportés dans la troisième colonne du tableau.

b. r (en m) $= D$ (en m) $\times \tan \alpha$
$\Rightarrow r = 4{,}19946 \times 1{,}496 \times 10^{11} \times \tan \alpha$. (Dernière colonne du tableau)

Bilan des mesures, représentation de $T^2 = f(r^3)$ et modélisation par une fonction linéaire :



VALIDER

3. a. La modélisation conduit à :
$k = 3{,}67 \times 10^{-16}$ s²·m⁻³.
La masse de Jupiter est $M_J = \dfrac{4\pi^2}{Gk} = 1{,}61 \times 10^{27}$ kg (valeur table $1{,}90 \times 10^{27}$ kg).
La principale source d'erreur est la mesure des distances Jupiter-satellite sur l'écran. Les trajectoires des satellites ne sont pas circulaires et on ne mesure pas forcément le demi grand axe mais l'excentricité est faible.

COMMUNIQUER

4. Pour mesurer la masse de la Terre, il suffit de mesurer la distance et la période de révolution des satellites de la Terre. En principe, un seul satellite suffit (la Lune par exemple) mais on peut améliorer la précision du résultat en choisissant plusieurs satellites parmi les nombreux satellites artificiels qui tournent autour de la Terre.

EXERCICES Appliquer le cours

Cinématique des mouvements circulaires (§1 du cours)

14. Reconnaître un mouvement circulaire uniforme

a. Oui car le fil est inextensible. Le rayon de la trajectoire est égal à la longueur du fil.

b. Il n'est pas uniforme car la vitesse n'est pas constante : la distance qui sépare deux positions consécutives du solide n'est pas constante alors que la durée entre deux photos l'est.

15. Caractériser le vecteur accélération

a. L'accélération n'est pas nulle car le vecteur vitesse est modifié : il change de direction.

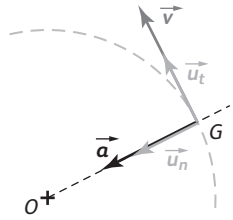
b. Le vecteur accélération du véhicule en mouvement circulaire et uniforme est :
– radial. Sa direction est celle du rayon de cercle correspondant à sa trajectoire ;
– centripète. Il est orienté vers le centre du cercle ;
– a pour valeur :

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(\dfrac{30}{3{,}6}\right)^2}{300} = 0{,}23 \text{ m·s}^{-2}.$$

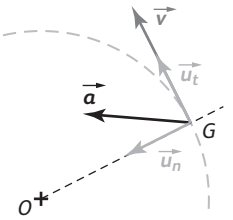
c. Si v est multipliée par 3 (soit une vitesse de 90 km × h⁻¹), a est multipliée par $3^2 = 9$.

16. Représenter des vecteurs

a. Voir schéma ci-dessous.



b. Le vecteur accélération n'est plus perpendiculaire au vecteur vitesse. Sa composante a_t sur $\vec{u_t}$ est positive.



Satellite en orbite circulaire (§2 du cours)

17. Calculer la valeur de la force de gravitation

a. En considérant Neptune et le Soleil ponctuels (ou à répartition sphérique de masse), la loi d'interaction gravitationnelle permet d'écrire :

$$F_{S/N} = G\frac{M_S M_N}{r_N^2}$$

$$F_{S/N} = \frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 1{,}99 \times 10^{30} \times 102 \times 10^{24}}{(4\,504 \times 10^{9})^2}$$

$F_{S/N} = 6{,}67 \times 10^{20}$ N.

b. $T_N = 2\pi\sqrt{\frac{r_N^3}{GM_S}}$ conduit à $T_N^2 = 4\pi^2\frac{r_N^3}{GM_S}$

soit $\frac{T_N^2}{r_N^3} = \frac{4\pi^2}{GM_S}$ et donc $M_S = \frac{4\pi^2 r_N^3}{GT_N^2}$.

A.N. : en utilisant les valeurs données dans les rabats du manuel, on peut écrire :

$$M_S = \frac{4 \times \pi^2 \times (4\,504 \times 10^9)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times (165 \times 365{,}25 \times 24 \times 3\,600)^2}$$

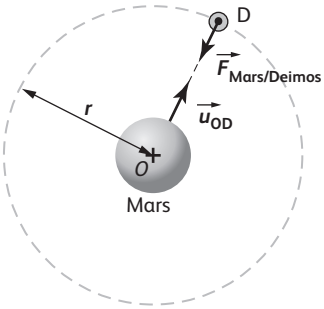
$= 1{,}99 \times 10^{30}$ kg.

18. Connaître le mouvement d'un satellite

a. $\frac{r}{L} = \frac{23{,}5 \times 10^3}{15} = 1{,}6 \times 10^3$.

L est donc négligeable devant r.

Deimos peut être considéré comme ponctuel.



b. En considérant Mars à répartition sphérique de masse et Deimos ponctuel, on peut écrire, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_{Mars/Deimos} = -G\frac{M_{Deimos}M_{Mars}}{r^2}\vec{u_{OD}}$$

$\vec{u_{OD}}$ est un vecteur unitaire de direction (OD) orienté de O vers D.

c. En considérant que M_{Deimos} est constante, l'application de la deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{Mars/Deimos} = M_{Deimos} \cdot \vec{a}_{Deimos}$$

d. $\vec{a}_{Deimos}$ est donc colinéaire à $\vec{F}_{Mars/Deimos}$ donc à $\vec{u_{OD}}$.

$\vec{a}_{Deimos}$ a pour direction la droite (OD), confondue avec le rayon du cercle correspondant à la trajectoire. Le mouvement de Deimos est circulaire et son vecteur accélération est radial. Le mouvement de Deimos est donc uniforme.

Lois de Kepler (§1 du cours)

19. Connaître la loi des orbites

a. La courbe ainsi obtenue est une ellipse : en notant M un point de la courbe : $P_1M + P_2M =$ cte

b. Mercure se situe sur la courbe (le point M par exemple) et le Soleil doit se situer en P_1 ou P_2. En effet, d'après la 1re loi de Kepler ou loi des orbites, Mercure décrit, dans le référentiel héliocentrique, une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers.

20. Connaître la loi des aires

a. D'après la 2e loi de Kepler ou loi des aires, le segment [SP], qui relie le centre du Soleil à celui de la planète, balaie des aires égales pendant des durées égales :

$$A = A'.$$

b. Pour respecter l'égalité précédente, $P_3P_4 < P_1P_2$ la distance parcourue pendant une même durée est plus grande lorsque la planète est plus proche du Soleil. Ainsi, la valeur de la vitesse n'est pas la même entre P_1 et P_2 et entre P_3 et P_4.

P est plus rapide sur le trajet P_1P_2.

21. Connaître la loi des périodes

a. En utilisant les valeurs données dans le tableau de l'exercice, on peut écrire :

Satellite	$\frac{T^2}{r^3}$ (j²·km⁻³)	OU	$\frac{T^2}{r^3}$ (s²·m⁻³)
Io	$4{,}17 \times 10^{-17}$		$3{,}11 \times 10^{-16}$
Europe	$4{,}17 \times 10^{-17}$		$3{,}11 \times 10^{-16}$
Ganymède	$4{,}17 \times 10^{-17}$		$3{,}11 \times 10^{-16}$
Callisto	$4{,}17 \times 10^{-17}$		$3{,}11 \times 10^{-16}$

La troisième loi de Kepler est vérifiée pour ces satellites :

$$\frac{T^2}{r^3} = k.$$

b. k dépend uniquement de la masse de l'astre autour duquel tournent les satellites. k permet donc de calculer la masse de Jupiter.

EXERCICES S'entraîner

22. Exercice résolu dans le manuel

23. Application de l'exercice résolu

1. La Terre est l'astre attracteur. En reprenant la démarche suivie dans la solution de l'exercice précédent, on trouve $v = \sqrt{\frac{GM_T}{r}}$.

2. La période de révolution est la durée mise par la Lune pour faire un tour complet autour de la Terre.

À vitesse constante, la distance parcourue est proportionnelle à la durée :

$$2\pi r = vT \Rightarrow 2\pi r = T\sqrt{\frac{GM_T}{r}}.$$

En élevant au carré cette expression :

$$4\pi^2 r^2 = \frac{GM_T T^2}{r} \Rightarrow r^3 = \frac{GM_T T^2}{4\pi^2} \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{GM_T T^2}{4\pi^2}}$$

A. N. :

$$r = \sqrt{\frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}98 \times 10^{24} \times (27 \times 86\,400 + 7 \times 3\,600 + 43 \times 60)^2}{4\pi^2}}$$

$= 3{,}83 \times 10^8$ m $= 3{,}83 \times 10^5$ km.

24. Exercice résolu dans le manuel

25. Application de l'exercice résolu

1. On suppose que les satellites ne sont soumis qu'à la force de gravitation exercée par Jupiter. Jupiter et ses satellites étant à répartition sphérique de masse, on peut utiliser la troisième loi de Kepler. En laissant la période de révolution de Io en jours, on obtiendra celles des autres satellites en jours également.

$$\frac{T_{\text{Europe}}^2}{r_{\text{Europe}}^3} = \frac{T_{\text{Io}}^2}{r_{\text{Io}}^3} \Rightarrow T_{\text{Europe}} = T_{\text{Io}} \sqrt{\left(\frac{r_{\text{Europe}}}{r_{\text{Io}}}\right)^3}$$

$$T_{\text{Europe}} = 1{,}77 \times \sqrt{\left(\frac{6{,}71 \times 10^5}{4{,}22 \times 10^5}\right)^3} = 3{,}55 \text{ j.}$$

On trouve de même : $T_{\text{Ganymède}} = 7{,}16$ j et $T_{\text{Callisto}} = 16{,}7$ j.

2. Pour calculer la masse de Jupiter, il faut utiliser un des satellites (Io par exemple) et exprimer toutes les grandeurs dans les unités du système international.

$$\frac{T_{\text{Io}}^2}{r_{\text{Io}}^3} = \frac{4\pi^2}{GM_{\text{Jupiter}}} \Rightarrow M_{\text{Jupiter}} = \frac{4\pi^2 r_{\text{Io}}^3}{T_{\text{Io}}^2 G}.$$

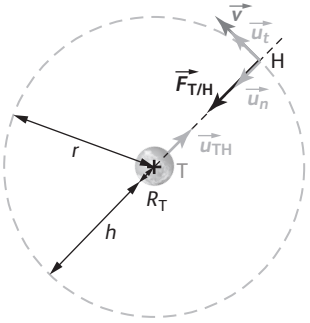
A. N. :

$$M_{\text{Jupiter}} = \frac{4\pi^2 \times (4{,}22 \times 10^8)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times (1{,}77 \times 86\,400)^2} = 1{,}90 \times 10^{27} \text{ kg.}$$

26. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Connaître, réaliser, valider.**

a. Le système étudié est le satellite terrestre Hubble noté H sur le schéma, de masse m, qui décrit, dans le référentiel géocentrique galiléen, un cercle de rayon $r = R_T + h$.



b. H étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_{T/H} = -G\frac{mM_T}{r^2}\vec{u}_{TH}$$

$\vec{u}_{TH}$ est un vecteur unitaire de direction (TH) orienté de T vers H.

$\vec{F}_{T/H}$ est donc appliquée en H, radiale et centripète (voir figure ci-dessus) et de valeur $F_{T/H} = G\frac{mM_T}{r^2}$.

c. En considérant que m est constante, l'application de la 2e loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{T/H} = m\vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G\frac{M_T}{r^2}\vec{u}_{TH}$$

$\vec{a}$ est donc colinéaire à $\vec{u}_{TH}$ et $\vec{a}$ a pour direction la droite (TH) confondue avec le rayon de cercle correspondant à la trajectoire.

Le mouvement de Hubble est circulaire et son vecteur accélération est radial.

Le mouvement de Hubble est donc uniforme.

Ce que l'on peut vérifier de la manière suivante :

dans (H, $\vec{u_t}$, $\vec{u_n}$), $\vec{u_n} = -\vec{u_{TH}}$, on peut ainsi écrire :

$$\vec{a} = 0 \cdot \vec{u_t} + G\frac{M_T}{r^2}\vec{u_n} \text{ et } \vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{u_t} + \frac{v^2}{r}\vec{u_n}$$

L'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur (H, $\vec{u_t}$) conduit à la relation $\frac{dv}{dt} = 0$ valable à chaque instant soit : v = cte. Le mouvement est donc uniforme.

d. L'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur (H, $\vec{u_n}$) conduit à la relation :

$G\frac{M_T}{r^2} = \frac{v^2}{r}$ soit, après simplification et sachant que $r = R_T + h$:

$$v = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}$$

A.N. : $v = \sqrt{\frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24}}{6{,}38 \times 10^6 \times 600 \times 10^3}} = 7{,}55 \times 10^3 \text{ m·s}^{-1}$.

e. La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T_H} \Rightarrow T_H = \frac{L}{v} = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM_T}{r}}} = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{GM_T}}$$

soit $T_H = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$

d'où :

$$T_H = 2\pi r\sqrt{\frac{(6{,}38 \times 10^6 + 600 \times 10^3)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24}}} = 5{,}81 \times 10^3 \text{ s}$$

soit un écart relatif de 3 % (faible) par rapport à l'indication du texte que l'on peut donc considérer comme correcte.

27. Constitution des anneaux de Saturne

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. Dans la relation $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$: G est la constante de gravitation universelle, M la masse de Saturne et r le rayon de l'orbite de la particule étudiée.

b. v augmente si r diminue. Pour être plus rapide, une particule doit donc être plus proche du centre de Saturne. Par contre, sa masse n'intervient pas dans l'expression de v.

c. La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

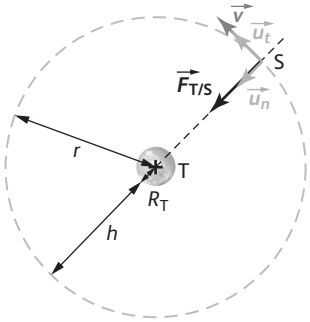
$$v = \frac{L}{T} \text{ soit } T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM}{r}}} = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{GM}} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}.$$

d. T est différent si r est différent. Ainsi, $T_A \neq T_B$. Si A et B sont alignés avec le centre de Saturne à un instant donné, lorsque B aura fait un tour, A ne l'aura pas encore terminé. A et B ne peuvent rester alignés avec le centre de Saturne. Les anneaux de Saturne ne peuvent pas être d'un seul tenant.

28. Mise en orbite d'un satellite

> COMPÉTENCES : **Connaître, réaliser.**

a. et **b.** S étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :



$$\overrightarrow{F_{T/S}} = +G\frac{mM_T}{(R_T+h)^2}\vec{u_n}$$

Le signe « + » met en évidence que $\overrightarrow{F_{T/S}}$ et $\vec{u_n}$ sont de même sens.

c. En considérant que *m* est constante, l'application de la 2e loi de Newton, dans le référentiel géocentrique galiléen, donne la relation ;

$$\overrightarrow{F_{T/S}} = m\vec{a_S} \quad \text{soit} \quad \vec{a_S} = G\frac{M_T}{(R_T+h)^2}\vec{u_n}$$

d. Dans le repère de Frenet $(S, \vec{u_t}, \vec{u_n})$, on peut ainsi écrire :

$$\vec{a_S} = 0\,\vec{u_t} + G\frac{M_T}{(R_T+h)^2}\vec{u_n} \text{ et } \vec{a_S} = \frac{dv}{dt}\vec{u_t} + \frac{v_S^2}{R_T+h}\vec{u_n}.$$

L'égalité des coordonnées de $\vec{a_S}$ sur $(S, \vec{u_n})$ conduit à la relation :

$$G\frac{M_T}{(R_T+h)^2} = \frac{v_S^2}{R_T+h} \text{ soit, après simplification :}$$

$$v_S = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T+h}}.$$

e. *T* est la période de révolution. C'est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

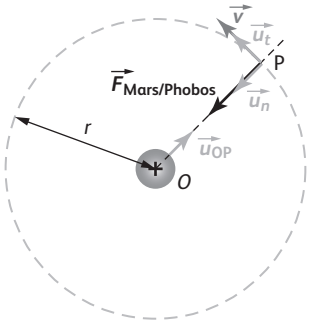
$$v = \frac{L}{T} \quad \text{soit :}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM_T}{r}}} = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{GM_T}} = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T+h)^3}{GM_T}}.$$

29. In English Please

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, valider.**

a.



b. Dans le référentiel marsocentrique, galiléen, le système étudié est Phobos de masse *m*, qui décrit, un cercle de rayon *r* et de centre O, centre de Mars de masse *M*.

Phobos étant ponctuel et Mars à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$F_{Mars/Phobos} = -G\frac{mM}{r^2}\overrightarrow{u_{OP}}$$

$\overrightarrow{u_{OP}}$ est un vecteur unitaire de direction (OP) orienté de O vers P.

Ainsi la force exercée par Mars sur Phobos a pour :

– direction : la droite (OP) ;

– sens : vers O ;

– point d'application : P ;

– valeur : $F_{Mars/Phobos} = G\frac{M}{r^2}$.

c. En considérant que *m* est constante, l'application de la 2e loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{Mars\,/\,Phobos} = m\vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G\frac{M}{r^2}\overrightarrow{u_{OP}}$$

Dans $(S, \vec{u_t}, \vec{u_n})$, $\vec{u_n} = -\vec{u_{OP}}$ on peut ainsi écrire :

$$\vec{a} = 0\cdot\vec{u_t} + G\frac{M}{r^2}\vec{u_n} \text{ et } \vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{u_t} + \frac{v^2}{r}\vec{u_n}.$$

L'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur $(P, \vec{u_n})$ conduit à la relation : $G\frac{M}{r^2} = \frac{v^2}{r}$ soit, après simplification : $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$.

La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$.

Le mouvement étant uniforme :

$v = \frac{L}{T}$ soit

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM}{r}}} = 2\pi r = \sqrt{\frac{r}{GM_T}} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}.$$

d. A.N. : $T = 2\pi\sqrt{\frac{(6\,000 + 3\,400)\times 10^3)^3}{6{,}67\times 10^{-11}\times 6{,}4\times 10^{23}}} = 2{,}8\times 10^4$ s.

e. $T_{Mars} = 24$ h 36 min $= 88\,560$ s.

$\frac{T_{Mars}}{T_{Phobos}} = 3{,}2.$

Ainsi, pendant que Mars effectue un tour sur elle-même, Phobos en effectue un peu plus de trois dans le même sens et passe donc deux fois au-dessus d'un point fixe de la surface de Mars. Les informations du texte sont vérifiées.

30. Des satellites artificiels à orbites elliptiques

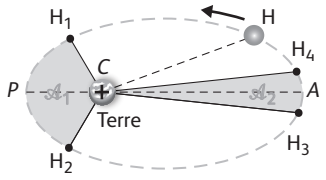
> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. Dans le référentiel géocentrique, la trajectoire du centre d'Hipparcos est une ellipse dont l'un des foyers est le centre de la Terre.

Le segment [CH] qui relie le centre *C* de la Terre à celui d'Hipparcos balaie des aires égales pendant des durées égales.

Pour tous les satellites de la Terre, le carré de leur période de révolution *T* est proportionnel au cube de la longueur *L* du demi-grand axe de leur orbite : $\frac{T^2}{L^3} = k$.

b.



c. D'après la 2e loi de Kepler ou loi des aires, pendant des durées égales les aires $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$ balayées par [CH] sont égales : $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2$.
Pour respecter cette égalité, $H_3H_4 < H_1H_2$. La distance parcourue pendant une même durée est plus grande lorsque la planète est plus proche du Soleil.
d. Ainsi, la vitesse n'est pas la même entre H_1 et H_2 et entre H_3 et H_4. H est plus rapide sur le trajet H_1PH_2, donc sa vitesse est maximale en *P* au Périgée et minimale en *A* à l'Apogée.

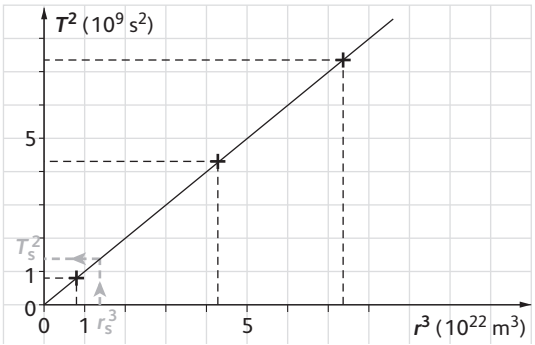
31. Comparaison de satellites terrestres

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser.**

a. La courbe $T^2 = f(r^3)$ est une droite passant par l'origine. Ainsi T^2 est proportionnel à r^3. La 3e loi de Kepler est vérifiée pour les satellites de la Terre :

$$T^2 = k \times r^3.$$

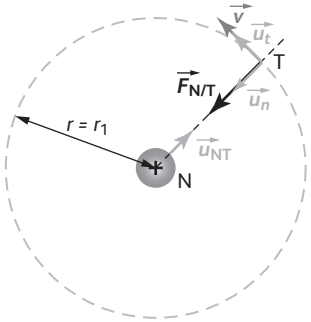
b. $r_S = 24 \times 10^3$ km $\Rightarrow r_S^3 = 1{,}4 \times 10^{22}$ m^3.
Graphiquement :
$T_S^2 = 1{,}4 \times 10^9$ s^2 $\Rightarrow T_S = 3{,}7 \times 10^4$ s



32. ★ Deux satellites de Neptune

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. Le référentiel dans lequel le mouvement de Triton est circulaire est le référentiel lié au centre de l'astre autour duquel tourne Triton : il s'agit du référentiel neptunocentrique.



b. Dans le référentiel neptunocentrique, galiléen, le système étudié est Triton de masse *m*, qui décrit, un cercle de rayon *r* et de centre N, centre de Neptune de masse M_N.
Triton et Neptune pouvant être considéré comme ponctuels (« le rayon de l'orbite de Triton est grand devant la dimension de Neptune ou Triton »), d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\overrightarrow{F_{N/T}} = -G\frac{mM_N}{r^2}\overrightarrow{u_{NT}}$$

$\overrightarrow{u_{NT}}$ est un vecteur unitaire de direction (TN) orienté de N vers T.
En considérant que *m* est constante, l'application de deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\overrightarrow{F_{N/T}} = m\vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G\frac{M_N}{r^2}\overrightarrow{u_{NT}}.$$

Dans $(T, \vec{u_t}, \vec{u_n})$, $\vec{u_n} = -\overrightarrow{u_{NT}}$ on peut ainsi écrire :

$$\vec{a} = 0 \cdot \vec{u_t} + G\frac{M}{r^2}\vec{u_n} \text{ et } \vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{u_t} + \frac{v^2}{r}\vec{u_n}.$$

L'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur $(T, \vec{u_t})$ conduit à la relation : $\frac{dv}{dt} = 0$ valable à chaque instant soit : $v =$ cte. Le mouvement est donc uniforme.
c. On note maintenant v_1 la vitesse de Triton et r_1 le rayon de sa trajectoire utilisée à la question suivante. En adaptant les relations précédentes à ces notations, l'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur $(T, \vec{u_n})$ conduit à la relation $G\frac{M_N}{r_1^2} = \frac{v_1^2}{r_1}$ soit, après simplification : $v_1 = \sqrt{\frac{GM_N}{r_1}}$.
La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v_1 = \frac{L}{T_1} \text{ soit}$$

$$T_1 = \frac{2\pi r_1}{v_1} = \frac{2\pi r_1}{\sqrt{\frac{GM_N}{r_1}}} = 2\pi r_1\sqrt{\frac{r_1}{GM_N}} = 2\pi\sqrt{\frac{r_1^3}{GM_N}}$$

d. $T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{r_1^3}{GM_N}}$ conduit à $T_1^2 = 4\pi^2\frac{r_1^3}{GM_N}$ soit :

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{GM_N \times T_1^2}{4\pi^2}}.$$

A. N. :

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{6{,}67\times10^{-11}\times1{,}0\times10^{26}\times(5{,}9\times24\times3\,600)^2}{4\pi^2}}$$

$$= 3{,}5 \times 10^8 \text{ m}.$$

e. D'après la 3e loi de Kepler :

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{L_2^3} \text{ soit}$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{L_2^3 T_1^2}{r_1^3}} = T_1\sqrt{\left(\frac{L_2}{r_1}\right)^3} = 5{,}9\sqrt{\left(\frac{5{,}5\times10^6\times10^3}{3{,}5\times10^8}\right)^3}$$

$$= 3{,}7 \times 10^2 \text{ j} = 3{,}2 \times 10^7 \text{ s}.$$

33. ★ Mouvement d'un astéroïde

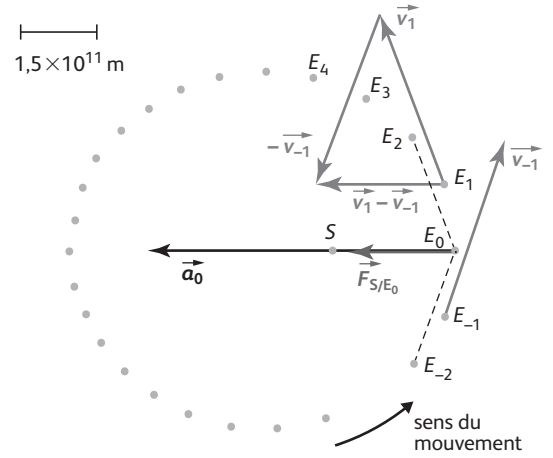
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Le mouvement d'Eva n'est pas circulaire car l'astéroïde n'évolue pas à égale distance du centre de la trajectoire. D'autre part, on observe clairement que le Soleil n'occupe pas le centre de la trajectoire mais se trouve décalé en un point appelé foyer de l'ellipse.

Le mouvement d'Eva n'est pas non plus uniforme car la valeur de la vitesse d'Eva n'est pas constante le long de la trajectoire. La distance entre deux points consécutifs n'est pas constante.

b. E_0E_2 mesure 1,6 cm sur le document original pour une échelle de 1 cm pour $1{,}5 \times 10^{11}$ m en réalité.

Ainsi :



$$v_1 = \frac{E_0E_2}{2\tau} = \frac{1{,}6 \times 1{,}5 \times 10^{11}}{2 \times 54 \times 24 \times 3\,600} = 2{,}6 \times 10^4 \text{ m·s}^{-1}.$$

De même :

$$v_{-1} = \frac{E_{-2}E_0}{2\tau} = \frac{1{,}6 \times 1{,}5 \times 10^{11}}{2 \times 54 \times 24 \times 3\,600} = 2{,}6 \times 10^4 \text{ m·s}^{-1}.$$

c. Le tracé des vecteurs est réalisé sur l'enregistrement à l'échelle 1 cm pour 1×10^4 m·s^{-1}.

Le vecteur est $\Delta\vec{v_0} = \vec{v_1} - \vec{v_{-1}}$ est tracé par différence des deux vecteurs en reportant $-\vec{v_{-1}}$ au sommet de $\vec{v_1}$. La valeur a_0 de l'accélération en E_0 est donc :

$$a_0 = \left\| \frac{\vec{v_1} - \vec{v_{-1}}}{2\tau} \right\|$$

Or, $\Delta\vec{v_0} = \vec{v_1} - \vec{v_{-1}}$ mesure 1,9 cm sur le papier avec l'échelle 1 cm pour 1×10^4 m·s^{-1} soit :

$$\left\|\vec{v_1} - \vec{v_{-1}}\right\| = 1{,}9 \times 10^4 \text{ m·s}^{-1}.$$

Finalement : $a_0 = \dfrac{1{,}9 \times 10^4}{2 \times 54 \times 24 \times 3\,600} = 2{,}0 \times 10^{-3}$ m·s^{-2}, qui confirme la donnée de l'énoncé.

d. $\vec{a_0}$ est appliqué en E_0. Il a la même direction et le même sens que $\Delta\vec{v_0} = \vec{v_1} - \vec{v_{-1}}$ et à l'échelle 1 cm pour $0{,}50 \times 10^{-3}$ m·s^{-2}, sa taille est alors de 4,0 cm (voir figure).

e. En considérant que la masse m d'Eva est constante, l'application de la 2e loi de Newton dans le référentiel héliocentrique galiléen donne en E_0 la relation :

$$\vec{F}_{S/E_0} = m \cdot \vec{a_0} \textbf{ (1)}.$$

Ainsi $\vec{F}_{S/E_0}$ et $\vec{a_0}$ doivent être colinéaire et de même sens. C'est bien le cas ici.

f. En considérant que l'astéroïde Eva est ponctuel et que le Soleil est à répartition sphérique de masse, la loi d'interaction gravitationnelle permet d'écrire :

$$F_{S/E_0} = G\frac{mM_S}{d^2_{SE_0}}.$$

La relation **(1)** en termes de valeurs permet d'écrire :

$$F_{S/E_0} = ma_0 \text{ soit } G\frac{mM_S}{d^2_{SE_0}} = ma_0$$

ce qui conduit à : $G\dfrac{M_S}{d^2_{SE_0}} = a_0$.

Finalement : $M_S = \dfrac{a_0 d^2_{SE_0}}{G}$.

A. N. : d_{SE_0} mesure 1,6 cm sur le papier avec 1 cm pour $1{,}5 \times 10^{11}$ m en réalité.

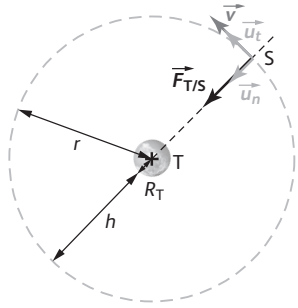
Ainsi : $M_S = \dfrac{2 \times 10^{-3} \times (1{,}6 \times 1{,}5 \times 10^{11})}{6{,}67 \times 10^{-11}} = 2 \times 10^{30}$ kg.

34. ★ Satellite géostationnaire

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

1. a. Le système étudié est un satellite terrestre ponctuel S, de masse m_S, qui décrit, dans le référentiel géocentrique galiléen, un cercle de rayon r.

S est considéré comme étant uniquement soumis à la force d'attraction gravitationnelle $\vec{F}_{T/S}$ exercée par la Terre, de masse M_T.



S étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_{T/S} = -G\frac{m_S M_T}{r^2}\vec{u_{TS}}$$

$\vec{u_{TS}}$ est un vecteur unitaire de direction (TS) orienté de T vers S.

En considérant que m est constante, l'application de la 2e loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{T/S} = m_S \cdot \vec{a}.$$

Cette relation implique que l'accélération et la force de gravitation sont colinéaires.

Or, la trajectoire 2 ne permet pas de respecter cette condition. L'accélération doit être contenue dans le plan de la trajectoire circulaire ($\vec{a}$ est contenu dans le plan de la base de Frenet), elle ne peut également pas passer par le centre de la Terre comme $\vec{F}_{T/S}$.

b. Pour être immobile dans un référentiel terrestre, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et tourner dans un plan parallèle ou confondu avec celui de la trajectoire de ce point. Ce plan doit donc être perpendiculaire à l'axe des pôles. La trajectoire 2 ne convenant pas d'après la réponse **1. a.**, il ne reste que la trajectoire 1 possible.

2. a. Dans la relation $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$, T représente la période de révolution du satellite, r est le rayon de son orbite autour de la Terre et M la masse de la Terre.

b. Pour être immobile dans un référentiel terrestre, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et tourner donc avec la même période : la période de révolution T_S d'un satellite géostationnaire est égale à la période de rotation T_{Terre} de la Terre :

$$T_S = T_{Terre} = 23\text{ h, }56\text{ min, }4\text{ s} = 86164\text{ s}$$

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \text{ conduit à } T_S = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}.$$

c. Pour l'ISS :

$$T_{ISS} = 2\pi\sqrt{\frac{(6{,}38\times10^6 + 400\times10^3)^3}{6{,}67\times10^{-11}\times5{,}97\times10^{24}}} = 5{,}56\times10^3\text{ s}.$$

Pour Anik1 :

$$T_{ISS} = 2\pi\sqrt{\frac{(6{,}38\times10^6 + 35{,}8\times10^3\times10^3)^3}{6{,}67\times10^{-11}\times5{,}97\times10^{24}}}$$

$$= 8{,}63\times10^4\text{ s}.$$

$T_{Anik1} \approx T_{Terre}$ (0,1 % d'écart relatif seulement) alors que $T_{ISS} \neq T_{Terre}$ (94 % d'écart relatif) : Anik1 est un satellite géostationnaire contrairement à la station ISS.

35. ★ Saturne et ses satellites

> COMPÉTENCES : **Connaître, réaliser.**

a. L'application de la deuxième loi de Newton et celle de l'interaction gravitationnelle à Janus dans le référentiel Saturnocentrique, galiléen, conduit à :

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{r_1^3}{GM_S}}$$

d'où : $T_1^2 = 4\pi^2\frac{r_1^3}{GM_S}$ soit $r_1 = \sqrt[3]{\frac{GM_ST_1^2}{4\pi^2}}$.

A. N. :

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{6{,}67\times10^{-11}\times5{,}7\times10^{26}\times(17\times3\,600 + 58\times60)^2}{4\pi^2}}$$

$$= 1{,}6\times10^8\text{ m}.$$

b. D'après la troisième de Kepler :

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3}$$

$$\Rightarrow T_2 = T_1\sqrt{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^3}$$

$$= (17\times3\,600 + 58\times60)\times\sqrt{\frac{238\times10^3\times10^3}{1{,}6\times10^8}}$$

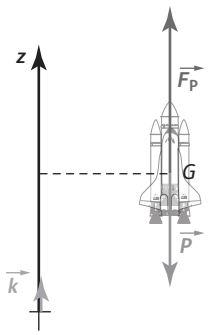
$$= 1{,}2\times10^5 = 33\text{ h}.$$

36. ★ Champ de gravitation

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, valider.**

1. a. On étudie tout d'abord la navette dans un référentiel terrestre considéré comme galiléen.

Au décollage, en négligeant les frottements, la navette subit :
– son poids $\vec{P}$;
– la poussée $\vec{F_P}$.



b. En négligeant la variation de masse, l'application de la deuxième loi de Newton donne :

$$\vec{P} + \vec{F_P} = m\vec{a_G}$$

En projection sur $(O, \vec{k})$, on a :

$$P_z + F_{Pz} = m\cdot a_z$$

$$-mg + F_P = m\cdot a$$

soit : $a = \frac{F_P}{m} - g$.

A. N. : $a = \frac{32{,}4\times10^6}{2{,}041\times10^6} - 9{,}8 = 6{,}1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

c. Les conditions initiales sont pour $t_0 = 0$ s : $z(t_0) = 0$ m et $v_z(t_0) = 0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

En supposant l'accélération constante : $a_z = +a$.

Or, $a_z = \frac{dv_z}{dt}$. Par intégration, $v_z = at + C_1$.

D'après les conditions initiales : $v_z(t_0) = a\times0 + C_1 = 0$.

Ainsi, $v_z = at$.

Or $v_z = \frac{dz}{dt}$. Par intégration, $z = \frac{1}{2}at^2 + C_2$.

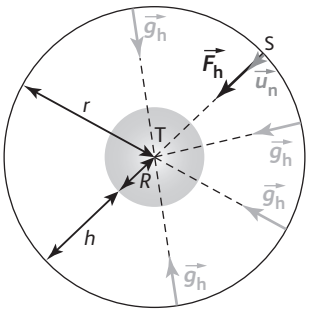
D'après les conditions initiales $z(t_0) = \frac{1}{2}a\times0 + C_2 = 0$.

Ainsi, $z = \frac{1}{2}at^2$.

La distance parcourue pendant $t = 2$ s est :

$$d = \frac{1}{2}\times6{,}1\times2^2 = 1\times10^1\text{ m (12 m)}.$$

2. a.



b. La navette étant satellisée, on la note S. On la considère comme étant ponctuelle et la Terre à répartition sphérique de masse.

D'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F_h} = +G\frac{mM_T}{r^2}\vec{u_n} \quad \textbf{(1)}$$

Ainsi, comme $\vec{g_h} = \frac{\vec{F_h}}{m}$ alors $\vec{g_h} = G\frac{M_T}{(R+h)^2}\vec{u_n}$.

c. D'après l'expression précédente :

$$g_h = G\frac{M_T}{(R+h)^2} \text{ et } g_0 = \frac{M_T}{(R)^2}$$

ce qui implique : $g_0R^2 = GM_T$ et donc $g_h = G\frac{R^2}{(R+h)^2}g_0$.

d. Dans la base de Frenet $(S, \vec{u_t}, \vec{u_n})$, $\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{u_t} + \frac{v^2}{r}\vec{u_n}$ ce qui donne pour la navette en mouvement uniforme :

$$\left(\frac{dv}{dt} = 0\right) : a = \frac{v^2}{r}.$$

e. L'application de la 2e loi de Newton appliquée à la navette satellisée dans le référentiel géocentrique galiléen conduit à :

$$\vec{F_h} = m\vec{a}$$

ce qui implique :

$F_h = ma$, soit

$$G\frac{mM_T}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$$

$$\Rightarrow v^2 = G\frac{M_T}{r}$$

$$\Rightarrow v^2 = \frac{g_0R^2}{r} = g_h\frac{(R+h)^2}{(R+h)} = g_h(R+h)$$

f.

$$g_h = \frac{R^2}{(R+h)^2}g_0 = \frac{(6{,}38\times10^6)^2}{(6{,}38\times10^6 + 296\times10^3)^2}\times 9{,}8 = 9{,}0 \text{ m·s}^{-2}.$$

$$v = \sqrt{g_h(R+h)} = \sqrt{9{,}0\times(6{,}38\times10^6 + 296\times10^3)}$$

$$= 7{,}8\times10^3 \text{ m·s}^{-1}.$$

L'écart relatif par rapport à la donnée du texte est inférieur à 0,5 %. Les valeurs sont compatibles.

37. ★★ Satellites météorologiques

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. Pour être géostationnaire, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et tourner donc dans un plan parallèle ou confondu avec celui de la trajectoire de ce point dans le référentiel géocentrique. Il faut donc $I = 0°$.

D'autre part, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et tourne donc avec la même période ; la période de révolution d'un satellite géostationnaire est égale à la période de rotation de la Terre :

$$T_s = T_{Terre} = 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s} = 86\,164 \text{ s}.$$

Les deux conditions précédentes sont remplies par Météosat :

$I = 0°$ et $T = 1\,436 \text{ min} = 1\,436\times60 = 8{,}616\times10^4$ s.

b. Dans le référentiel géocentrique, le plan de la trajectoire des satellites NOAA est fixe alors que la Terre tourne autour de l'axe des pôles. Une caméra placée à bord du satellite voit la Terre « défiler » d'où le nom de satellites à défilement.

Si on note T la période de révolution du satellite, α l'angle de rotation de la Terre pendant la durée T ; la Terre effectue une rotation de 2π pendant la durée $T_{Terre} = 1\,436$ min.

Donc, pendant T : $\alpha = \frac{2\pi T}{T_{Terre}}$.

Notons M_1 le point de la surface de la Terre lors du premier passage et M_2 celui survolé lors du passage suivant. La distance d recherchée est la longueur de l'arc :

$$d = \overset{\frown}{M_1M_2} = \alpha R_T = \frac{2\pi T}{T_{Terre}}R_T$$

A. N. : $d = \frac{2\pi\times100}{1\,436}\times6{,}38\times10^3 = 2{,}79\times10^3$ km.

c. $T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_T}} = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T+h)^3}{GM_T}}$

d'où :

$$T^2 = 4\pi^2\frac{(R_T+h)^3}{GM_T} \Rightarrow (R_T+h) = \sqrt[3]{\frac{T^2GM_T}{4\pi^2}}$$

$$\Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{T^2GM_T}{4\pi^2}} - R_T.$$

Pour un satellite géostationnaire :

$$h = \sqrt[3]{\frac{(1\,436\times60)^2\times6{,}67\times10^{-11}\times5{,}97\times10^{24}}{4\pi^2}} - 6{,}38\times10^6 = 3{,}58\times10^7 \text{ m}.$$

Pour un satellite NOAA :

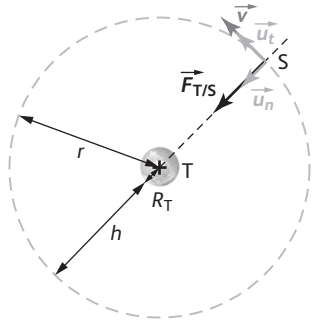
$$h = \sqrt[3]{\frac{(100\times60)^2\times6{,}67\times10^{-11}\times5{,}97\times10^{24}}{4\pi^2}} - 6{,}38\times10^6 = 7{,}45\times10^5 \text{ m}.$$

38. ★★ S'auto-évaluer

Application des lois de Newton

D'après la loi d'interaction gravitationnelle, S étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse :

$$\vec{F_{T/S}} = +G\frac{mM_T}{r^2}\vec{u_n} \quad \textbf{(1)}$$



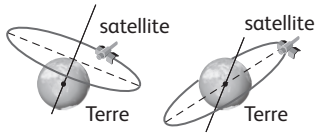
Deuxième loi de Newton

En considérant que m est constante, l'application de la deuxième loi de Newton dans le référentiel géocentrique galiléen donne la relation :

$$\vec{F_{T/S}} = m\cdot\vec{a_S} \quad \textbf{(2)}$$

Étude du plan de la trajectoire

Les trajectoires ci-contre ne peuvent donc convenir.



En effet, la relation **(2)** précédente implique que l'accélération et la force de gravitation sont colinéaires.

Or, la trajectoire de la figure de gauche ne permet pas de respecter cette condition. L'accélération doit être contenue dans le plan de la trajectoire circulaire ; elle ne peut également pas passer par le centre de la Terre comme $\overrightarrow{F_{T/S}}$ **(1)**.

D'autre part, pour être immobile dans un référentiel terrestre, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et donc tourner dans un plan parallèle ou confondu avec celui de la trajectoire de ce point. Ce plan doit donc être perpendiculaire à l'axe des pôles. La trajectoire de la figure de droite ne convient pas non plus.

Finalement, le mouvement d'un satellite géostationnaire s'effectue dans le plan équatorial de la Terre.

Accélération, vitesse et période

Les relations **(1)** et **(2)** conduisent à :

$$\overrightarrow{a_S} = G\frac{M_T}{r^2}\overrightarrow{u_n} \quad \text{soit} \quad \overrightarrow{a_S} = G\frac{M_T}{(R_T+h)^2}\overrightarrow{u_n}$$

Dans le repère de Frenet $(S, \overrightarrow{u_t}, \overrightarrow{u_n})$, $\overrightarrow{a_S} = \dfrac{dv}{dt}\overrightarrow{u_t} + \dfrac{v^2}{r}\overrightarrow{u_n}$.

L'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur $(S, \overrightarrow{u_n})$ conduit à la relation :

$$G\frac{M_T}{r^2} = \frac{v_S^2}{r} \text{ soit, après simplification } v_S = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T+h}}.$$

T est la période de révolution. C'est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v_S = \frac{L}{T} \text{ soit } T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\dfrac{GM_T}{r}}} = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{GM_T}}$$

soit $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{(R_T+h)^3}{GM_T}}$.

Altitude

$$T^2 = 4\pi^2\frac{(R_T+h)^3}{GM_T} \Rightarrow R_T + h = \sqrt[3]{\frac{T^2GM_T}{4\pi^2}}$$

$$\Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{T^2GM_T}{4\pi^2}} - R_T.$$

Pour être immobile dans un référentiel terrestre, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et donc tourner avec la même période ; la période de révolution d'un satellite géostationnaire est égale à la période de rotation de la Terre :

$$T = T_{\text{Terre}} = 23\text{ h }56\text{ min }4\text{ s} = 86\,164\text{ s}$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{86\,164^2 \times 6{,}67\times10^{-11}\times 5{,}97\times10^{24}}{4\pi^2}} - 6{,}38\times10^6$$

$$= 3{,}58\times10^7\text{m} \approx 36\,000\text{ km}.$$

Ainsi, un satellite géostationnaire orbite à environ 36 000 km de la surface de la Terre dans le plan équatorial de la Terre.

39. Rendez–vous orbital

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, communiquer.**

Rédiger une synthèse de documents consiste à extraire des informations de documents ou de connaissances et à les mettre en relation pour répondre à une problématique. Elle est parfois guidée, ce qui n'est pas le cas ici.

La rédaction d'une synthèse ne fait pas appel à d'autres sources, comme le dictionnaire ou Internet. Les documents, le cours et la culture générale suffisent à sa rédaction.

Le tableau en bas de page regroupe les éléments attendus dans la synthèse et permet également de construire un barème de correction.

Tableau de l'exercice 39 :

Synthèse satisfaisante		Synthèse non satisfaisante		Aucune synthèse	
Les éléments scientifiques sont présents (documents et connaissances) et mis en relation ; ils permettent de répondre à la problématique. La réponse est organisée sous forme d'une synthèse correctement rédigée.	Des éléments scientifiques solides sont présents mais de manière incomplète ou ils sont tous présents mais non mis en relation. La réponse est organisée et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques solides et bien choisis mais non mis en relation La réponse est organisée et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques incomplets ou mal choisis et mis en relation La réponse est organisée sous forme de synthèse et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques corrects.	Pas d'éléments scientifiques corrects.
5 points	4 points	3 points	2 points	1 point	0 point

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

40. DE HUBBLE À JAMES WEBB

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. Étude de l'orbite du télescope spatial Hubble

a. Le document 1 indique que le télescope est positionné sur une orbite basse à une altitude quasi constante $h = 600$ km.

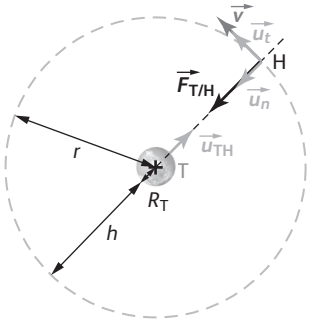
Dans le référentiel géocentrique, le télescope Hubble décrit donc une trajectoire circulaire.

b. Hubble n'est soumis qu'à la force gravitationnelle exercée par la Terre :

$\overrightarrow{F_{T/H}} = -G\dfrac{mM_T}{r^2}\overrightarrow{u_{TH}}$

$\overrightarrow{u_{TH}}$ est un vecteur unitaire de direction (TH) orienté de T vers H.

En considérant que m est constante, l'application de deuxième loi de Newton donne la relation :



$$\overrightarrow{F_{T/H}} = m\vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = \frac{M_T}{r^2}\overrightarrow{u_{TH}}.$$

Dans $(T, \vec{u_t}, \vec{u_n})$, $\overrightarrow{u_{T/H}} = -\vec{u_n}$ on peut ainsi écrire :

$$\vec{a} = 0\cdot\vec{u_t} + G\frac{M}{r^2}\vec{u_n} \quad \text{et} \quad \vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{u_t} + \frac{v^2}{r}\vec{u_n}.$$

L'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur $(T, \vec{u_t})$ conduit à la relation : $\dfrac{dv}{dt} = 0$ valable à chaque instant soit : $v = \text{cte}$. Le mouvement de Hubble est donc uniforme.

c. L'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur $(T, \vec{u_n})$ conduit à la relation $G\dfrac{M_T}{r^2} = \dfrac{v^2}{r}$ soit, après simplification :

$$v = \sqrt{\frac{GM_T}{r}}$$

r est le rayon de la trajectoire de Hubble :

$$r = R_T + h.$$

On obtient donc :

$$v = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}.$$

d. T est la période de révolution. C'est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T} \text{ soit } T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(R_T + h)}{v}.$$

e. Pour une trajectoire circulaire, la troisième loi de Kepler se met sous la forme $\dfrac{T^2}{r^3} = k$ où k est une constante qui ne dépend que de la masse de l'astre attracteur, ici la Terre.

f. Remplaçons v dans l'expression de la période :

$$T = \frac{2\pi(R_T + h)}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\dfrac{GM_T}{r}}} = 2\pi r_1\sqrt{\frac{r}{GM_T}} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_T}}.$$

Élevons cette expression au carré :

$$T = 4\pi^2\frac{r^3}{GM_T} \Rightarrow \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM_T}.$$

g. Calcul de T (ne pas oublier d'exprimer les distances en mètre) :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(6\,370 + 600)\times 10^3}{6{,}67\times 10^{-11}\times 5{,}97\times 10^{24}}} = 5{,}79\times 10^3 \text{ s}$$

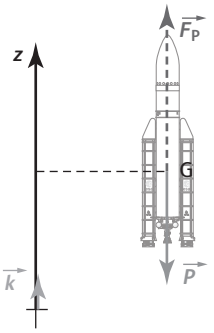
$= 96{,}6$ min.

2. Étude de la mise en orbite du télescope spatial James Webb

a. $P = mg = 780\times 10^3\times 9{,}8$

$= 7{,}6\times 10^6$ N

b. On étudie tout d'abord la fusée Ariane 5 dans un référentiel terrestre considéré comme galiléen.



Au décollage, en négligeant les frottements, la fusée subit :

– son poids $\vec{P}$;

– la poussée $\vec{F}$.

En négligeant la variation de masse, l'application de la deuxième loi de Newton donne :

$$\vec{P} + \vec{F} = M\vec{a_G}.$$

En projection sur $(O, \vec{k})$, on a :

$$P_z + F_z = M\cdot a_z$$

$$-Mg + F = M\cdot a$$

soit : $a = \dfrac{F}{M} - g$

c. $z(t) = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{F}{M} - g\right)t^2 = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{14{,}0\times 10^6}{780\times 10^3} - 9{,}8\right)\times 10^2$

$= 4{,}1\times 10^2$ m.

d. En réalité, les frottements de l'air ne sont pas négligeables. Leur travail convertit une partie de l'énergie cinétique en énergie thermique.

e. Le point L_2 est situé dans le cône d'ombre de la Terre. Le satellite pourra observer le ciel sans être gêné par la lumière du Soleil.

41. COUCHER DE SOLEILS SUR TATOOINE

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. Les étoiles Tatoo 1 et tatoo 2

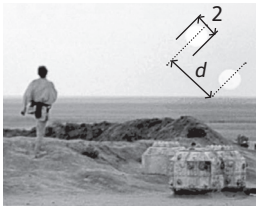
Par lecture sur la photo, on trouve

$d = 13$ *mm* et

$2r = 5$ *mm*

$r = 2{,}5$ *mm*

$\dfrac{d}{r} = 5{,}2 \approx 5.$

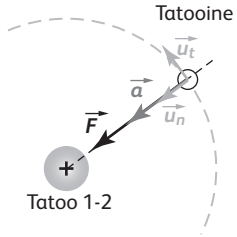


Le rayon d'une étoile est environ 5 fois plus petit que la distance qui sépare les centres des étoiles.
Chaque étoile a donc un rayon de 10/5 = 2 millions de km.

2. Tatooine en orbite

a. La distance qui sépare la planète des étoiles est d'environ 200 millions de km, distance nettement supérieure à 4 fois la distance qui sépare les étoiles.
On peut donc considérer que les deux étoiles n'en font qu'une et que la planète tourne autour de cette étoile unique.

b. Voir schéma ci-contre.



c. Dans le référentiel Tatoo-1-2-centrique, supposé galiléen, la planète Tatooine décrit une trajectoire circulaire sous l'action de la force gravitationnelle exercée par Tatoo 1-2.
La force gravitationnelle exercée par Tatoo 1-2 sur Tatooine peut s'écrire :

$$\vec{F} = +G\frac{mM}{r^2}\vec{u_n}.$$

En appelant m la masse de Tatooine et M celle de Tatoo 1-2. $\vec{u_n}$ étant le vecteur unitaire normal de la base de Frenet.
En considérant que m est constante, l'application de deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F} = m\vec{a} \text{ soit } \vec{a} = +G\frac{M}{r^2}\vec{u_n}.$$

Dans $(T, \vec{u_t}, \vec{u_n})$, on peut ainsi écrire :

$$\vec{a} = 0\cdot\vec{u_t} + G\frac{M}{r^2}\vec{u_n} \text{ et } \vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{u_t} + \frac{v^2}{r}\vec{u_n}.$$

L'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur $(T, \vec{u_t})$ conduit à la relation : $\frac{dv}{dt} = 0$ valable à chaque instant soit : v = cte. Le mouvement de Tatooine est donc uniforme.

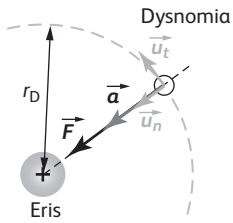
42. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Un nouveau statut pour Pluton

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer, connaître.**

1. Masse d'Eris

Le document 2 nous donne la période de révolution de Dysnomia autour d'ERIS ainsi que le rayon de son orbite supposée circulaire.
Ces deux grandeurs vont nous permettre de déterminer la masse d'Eris.



Faisons les hypothèses suivantes :
– le référentiel lié au centre d'Eris est galiléen (référentiel Erisocentrique) ;
– Eris et Dysnomia sont des corps à répartition sphérique de masse ;
– Dysnomia n'est soumis qu'à la force gravitationnelle d'Eris.

$$\overrightarrow{F_{E/D}} = +G\frac{mM}{R_D^2}\vec{u_n} \quad \textbf{(1)}$$

En appelant m la masse de Dysnomia et M celle d'Eris.
Appliquons la 2e loi de Newton. En considérant que m est constante, l'application de la 2e loi de Newton dans le référentiel érisocentrique galiléen donne la relation :

$$\overrightarrow{F_{E/D}} = m\cdot\vec{a} \quad \textbf{(2)}$$

Les relations **(1)** et **(2)** conduisent à : $\vec{a} = G\frac{M}{R_D^2}\vec{u_n}$.

Dans le repère de Frenet $(D, \vec{u_t}, \vec{u_n})$, l'égalité des coordonnées de $\vec{a}$ sur $(D, \vec{u_n})$ conduit à la relation :

$G\frac{M}{R_D^2} = \frac{v^2}{R_D}$ soit, après simplification $v = \sqrt{\frac{GM}{R_D}}$.

La période de révolution T est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi R_D$. Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T}$$

soit $T = \frac{2\pi R_D}{v} = \frac{2\pi R_D}{\sqrt{\frac{GM}{R_D}}} = 2\pi R_D\sqrt{\frac{R_D}{GM}} = 2\pi\sqrt{\frac{R_D^3}{GM}}$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R_D^3}{GM}}.$$

Exprimons M en fonction de T et R_D. Pour cela élevons la période au carré :

$T^2 = 4\pi^2\frac{R_D^3}{GM} \Rightarrow M = \frac{4\pi^2 R_D^3}{GT^2}$ (On retrouve la 3e loi de Kepler relative aux trajectoires circulaires.)

A. N. : $M = \frac{4\pi^2\times(3{,}60\times10^7)^3}{6{,}67\times10^{-11}\times(1{,}30\times10^6)} = 1{,}63\times10^{22}$ kg.

2. Statut de Pluton

Pluton est une petite planète puisque sa masse est 25 fois plus petite que celle de Mercure. Le calcul précédent montre qu'Eris a une masse légèrement plus grande que Pluton. Si Pluton garde son statut de planète du système solaire, il faut ajouter Eris ainsi que tous les gros astéroïdes (comme Cérès) et les corps de masses voisines qui seront découverts dans un avenir proche, à la liste des planètes du système solaire.
Pour ne pas avoir à modifier tous les livres traitant du système solaire à chaque nouvelle découverte, il a été décidé le 24 août 2006 de déclasser Pluton pour lui donner le rang de planète naine. Le système solaire garde donc huit planètes et un certain nombre de planètes naines qui risque d'augmenter au fil des découvertes.

CHAPITRE

10

COMPRENDRE

Oscillateurs et mesure du temps

> Manuel pages 220 à 243

Choix pédagogiques

Au cours de ce chapitre, de nombreux concepts sont développés et mis en œuvre dans l'étude des oscillateurs : certains ont déjà été travaillés dans les classes précédentes (énergies cinétique, potentielle de pesanteur, mécanique), d'autres sont introduits ici (travail d'une force constante, forces conservatives et non conservatives).
Pour faire le lien entre les oscillateurs mécaniques et la mesure du temps, nous avons privilégié l'étude des pendules. En effet, Ceux-ci rappellent l'image traditionnelle des pendules à balancier et par ailleurs, le programme limitant l'énergie potentielle à la seule énergie potentielle de pesanteur, l'introduction de l'énergie potentielle élastique (nécessaire à l'étude des horloges à ressort) ne nous a pas paru indispensable.
Parallèlement, nous avons cherché à montrer les développements actuels des horloges à travers une description simple du fonctionnement de l'horloge atomique au césium et des exemples de leurs utilisations (dans la vie quotidienne comme dans la recherche) et des recherches concernant leur évolution.
Cette double entrée (pendule à balancier, horloge atomique) permet de mettre en évidence la présence, la différence de nature et le rôle de l'oscillateur ; elle met également en valeur l'articulation entre les connaissances scientifiques d'une époque et les instruments qui sont développés, montrant ainsi l'évolution des théories scientifiques et des techniques.
Nous avons cherché à conserver cette cohérence jusqu'aux exercices « Objectif bac ».
Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

En 2018, le projet européen Pharao va tester, dans la Station spatiale internationale ISS en orbite autour de la Terre, un nouveau type d'horloge atomique associant ultra-froids et faible gravité.

Quel est l'intérêt de cette nouvelle horloge ?

La photographie montre la Station spatiale internationale (ISS) dans laquelle prendra prochainement place l'horloge atomique du projet européen *Pharao*. En 2018, *Pharao* deviendra en effet la première horloge à atomes froids en orbite autour de la Terre. La très grande précision de cette horloge (*Pharao* devrait dévier maximum d'une seconde toutes les 300 millions d'années) permettra de vérifier les effets prédits par la théorie de la relativité générale avec une précision accrue.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Les horloges atomiques

Commentaires

Nous avons choisi une première activité centrée sur les horloges pour situer clairement la problématique de ce chapitre. Noël Dimarcq, physicien impliqué directement dans la conception des horloges atomiques, fait découvrir aux élèves le monde des laboratoires de recherche (avec ses questions théoriques sensibles, ses applications dans les grandes expériences scientifiques, etc.), et d'autre part, les amène à faire le lien avec des applications très courantes (mais pas forcément visibles) de la vie quotidienne.
Dans cette interview, les élèves situent d'emblée les horloges atomiques et les recherches actuelles dans le long processus de recherche pour améliorer la précision des horloges.
Dans les explications du principe de l'horloge au césium, les élèves retrouvent des notions connues : niveaux d'énergie d'un atome, énergie des photons et fréquence associée, précision d'une mesure.
Le film édité par le CNRS, *À l'heure des atomes froids*, permet de compléter et d'enrichir cette approche de la mesure du temps. Vous pouvez le retrouver à l'adresse suivante : http://videotheque.cnrs.fr/

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. D'après Noël Dimarq, les horloges mécaniques ou les horloges à quartz manquent de stabilité car la fréquence de ces horloges varie au cours du temps (modification de leur forme par usure, changement de température, etc).
b. Augmenter la fréquence de l'oscillateur qui pilote une horloge permet d'augmenter la précision de celle-ci.

RÉALISER

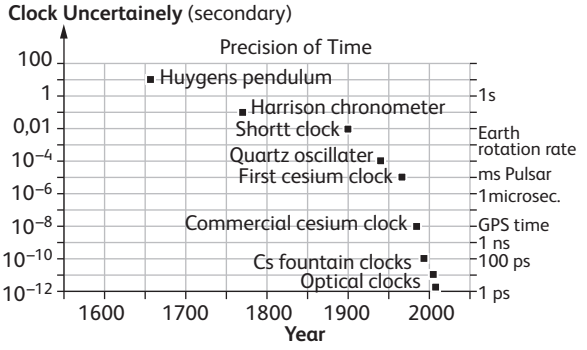
2. Pour vérifier la cohérence entre les deux valeurs de la précision, on compare l'écart exprimé en seconde à la durée également exprimée en secondes soit :

$$10^{-11}\ \text{s/jour} = \frac{10^{-11}}{24 \times 3\,600} = 1{,}1 \times 10^{-16}.$$

Les résultats ont bien le même ordre de grandeur ; 10^{-16}.
Remarque : la précision exprimée en s/jour paraît moins abstraite aux élèves que lorsqu'elle est exprimée par son ordre de grandeur.

COMMUNIQUER

3. L'objectif de cette recherche documentaire est d'amener les élèves à utiliser les données du texte de l'entretien, à rechercher des compléments, de nouvelles pistes, à s'intéresser et s'interroger sur la science d'aujourd'hui.
Dans l'article « La mesure du temps au XXIe siècle » de C. Salomon (Séminaire Poincaré XV Le Temps (2010), p103 – 113) disponible sur le site http://www.bourbaphy.fr/salomon.pdf ; on trouve par exemple la représentation graphique suivante représentant l'évolution de la précision de la mesure du temps depuis Huyghens.



2. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Une balançoire en pleine nature

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

3. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Étude énergétique des oscillations d'un pendule

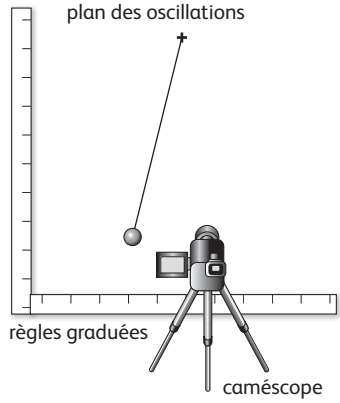
Commentaires

L'objectif de cette activité est d'étudier l'évolution de l'énergie mécanique d'un oscillateur lorsqu'on peut négliger les frottements ou au contraire lorsque l'oscillateur est soumis à des frottements. C'est donc les problématiques de transferts énergétiques et de conservation ou non conservation de l'énergie mécanique qui sont traitées ici.

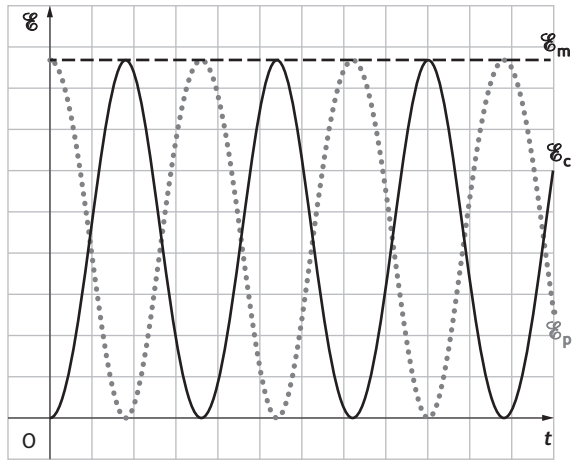
Réponses

RÉALISER

1. Pour étudier comment varie au cours du temps l'énergie d'un pendule formé d'un fil et d'une boule, il faut enregistrer les positions successives de la boule du pendule :
– on positionne la caméra vidéo ou la webcam face au pendule ;
– on place une (ou deux) règle(s) graduée(s) dans le champ de la caméra afin de pouvoir étalonner la vidéo lors du pointage des positions successives de la boule avec un logiciel approprié ;
– cette (ou ces) règle(s) graduée(s) est (sont) placée(s) dans le même plan que le pendule et le plus proche possible de l'axe de la caméra afin d'éviter au maximum les erreurs de parallaxe.



Au cours d'une ou deux périodes d'oscillations du pendule, les frottements de l'air peuvent être négligés. Aux incertitudes expérimentales près, on obtient les représentations graphiques suivantes :



Remarque : la période T des oscillations a une valeur double de celle de la période des énergies cinétique et potentielle.

VALIDER

2. a. Les positions pour lesquelles l'image du pendule apparaît la plus nette sur la vidéo sont les positions où la

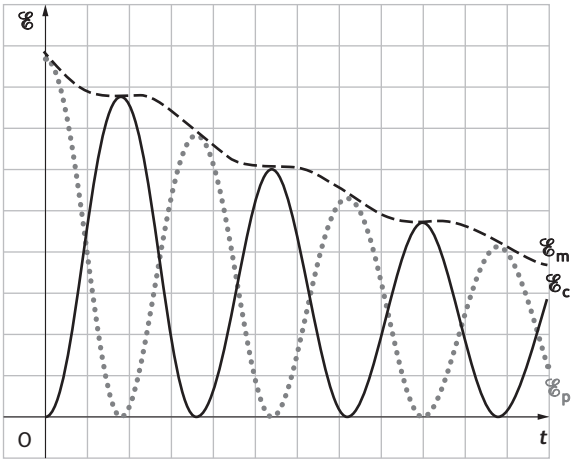
valeur de la vitesse du pendule est la plus faible, c'est-à-dire lorsque la valeur absolue de son abscisse angulaire est la plus grande ($x = \pm x_{max}$ et $y = y_{max}$).
Les positions pour lesquelles l'image du pendule apparaît la moins nette sur la vidéo sont les positions où la valeur de la vitesse du pendule est la plus grande, c'est-à-dire lorsque la valeur absolue de son abscisse angulaire est nulle ($x = 0$ et $y = 0$).
b. L'énergie mécanique reste constante au cours des oscillations : elle se conserve.
Les énergies cinétique et potentielle varient au cours du temps : l'énergie cinétique est maximale lorsque l'énergie potentielle de pesanteur est nulle et réciproquement.
c. Au cours du mouvement du pendule, il y a des transferts énergétiques car l'énergie potentielle de pesanteur est convertie en énergie cinétique, qui est elle-même convertie en énergie potentielle de pesanteur, etc.

ANALYSER

3. Pour étudier les différents paramètres influençant la dissipation de l'énergie mécanique du pendule, il faut réaliser la même expérience dans l'eau afin de s'intéresser au paramètre « milieu extérieur ».
Une autre expérience doit aussi être réalisée dans l'air en accrochant une feuille cartonnée sur la boule par exemple pour étudier le paramètre « forme de l'objet fixé au fil ».
Remarque : lors de chacune de ces expériences, il est indispensable de ne faire varier qu'un seul paramètre. Ainsi, il faut veiller à ce que la masse de la feuille cartonnée soit négligeable devant la masse de la boule lorsque le paramètre « forme de l'objet fixé au fil » est étudié.

RÉALISER

4. Lorsque l'expérience est réalisée dans l'eau ou si on accroche une feuille cartonnée sur la boule, il y a dissipation de l'énergie mécanique car les forces de frottement ne peuvent plus être négligées.



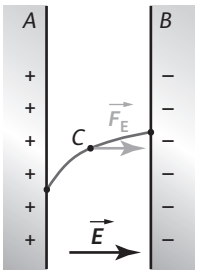
Ainsi, le milieu extérieur et la forme de l'objet fixé au fil influent sur l'amortissement des oscillations du pendule.

EXERCICES Appliquer le cours

Travail d'une force (§1 du cours)

13. Calculer le travail de la force de pesanteur
À la montée :
$\mathcal{W}_{AB}(\vec{P}) = mg\,(z_{départ} - z_{arrivée})$
$\mathcal{W}_{AB}(\vec{P}) = 6{,}5 \times 10^3 \times 9{,}81 \times (1\,038 - 2310) = -8{,}1 \times 10^7$ J
Le travail du poids de la cabine est résistant.
À la descente : $W_{BA}(\vec{P}) = +8{,}1 \times 10^7$ J.
Le travail du poids de la cabine est moteur.

14. Calculer le travail d'une force électrique constante
a. La force électrique $\vec{F_E}$ est liée au champ électrique $\vec{E}$ par la relation : $\vec{F_E} = q\vec{E}$
La charge q étant positive, les vecteurs $\vec{F_E}$ et $\vec{E}$ ont même direction et même sens.



$\vec{F_E}$ a pour valeur :
$F_E = |q| \times E$ soit :
$F_E = 3{,}2 \times 10^{-19} \times 5{,}0 \times 10^4$
$F_E = 1{,}6 \times 10^{-14}$ N
b. Le travail de la force électrique constante $\vec{F_E}$ ne dépend que de la tension U entre les plaques A et B :

$$\mathcal{W}_{AB}(\vec{F_E}) = qU_{AB}$$

Dans le condensateur plan, la tension entre les plaques A et B et la valeur du champ électrique E sont liées par la relation :

$$E = \frac{U_{AB}}{d} \text{ soit } U_{AB} = Ed$$

On en déduit $\mathcal{W}_{AB}(\vec{F_E}) = qEd$;
soit $\mathcal{W}_{AB}(\vec{F_E}) = 3{,}2 \times 10^{-19} \times 5{,}0 \times 10^4 \times 0{,}10$
$\mathcal{W}_{AB}(\vec{F_E}) = 1{,}6 \times 10^{-15}$ J.

Force conservative et non conservative (§2 du cours)

15. Calculer l'énergie mécanique
a. L'énergie mécanique de la balle de masse m s'exprime par : $\mathcal{E}_m = mgz + \frac{1}{2}mv^2$
avec z l'altitude de la balle et v la valeur de sa vitesse.
Remarque : l'énergie potentielle est telle que $\mathcal{E}_p = 0$ pour $z = 0$, c'est-à-dire lorsque la balle est au niveau du sol.
Juste après l'impact sur la raquette, l'énergie mécanique de la balle est donc égale à :

$$\mathcal{E}_{m_0} = mgz_0 + \frac{1}{2}mv_0^2$$
$$\mathcal{E}_{m_0} = 0{,}150 \times 9{,}81 \times 2{,}0 + \frac{1}{2} \times 0{,}150 \times \left(\frac{90 \times 10^3}{3{,}6 \times 10^3}\right)^2$$
$$= 5{,}0 \times 10^1 \text{ J}$$

b. En l'absence de frottements, le système est conservatif. Lorsque la balle passe au dessus du filet, son énergie mécanique a la même valeur que juste après l'impact soit :

$$\mathcal{E}_m = 5{,}0 \times 10^1 \text{ J}$$

Remarque : la hauteur du filet n'a aucune influence sur ce résultat.

Étude énergétique des oscillateurs libres (§3 du cours)

16. Analyser les transferts énergétiques

a. La trajectoire du centre d'inertie du trapéziste est un arc de cercle. Pendant une oscillation, le centre d'inertie du trapéziste effectue un aller-retour.

b. On choisit d'étudier le mouvement du centre d'inertie du trapéziste depuis une position d'altitude maximale jusqu'au retour à cette position (soit une oscillation).

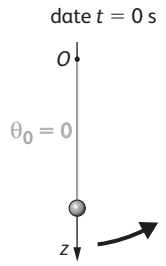
	Descente 1		Montée 1	
$\mathscr{E}_{pp}$	diminue	0	augmente	
$\mathscr{E}_c$	augmente		diminue	0

	Descente 2		Montée 2	
$\mathscr{E}_{pp}$	diminue	0	augmente	
$\mathscr{E}_c$	augmente		diminue	0

17. Extraire et exploiter des informations

a. À la date $t = 0$ s, l'abscisse angulaire θ a la valeur $\theta = 0°$.
Quand t augmente, θ augmente : le pendule part donc de sa position d'équilibre et se déplace dans le sens positif choisi.

b. L'amplitude des oscillations est égale à : $\theta_{max} = 10°$.
La période du pendule est de $T = 0{,}5$ s.



18. Réaliser une analyse dimensionnelle

$\dim(T) = \mathrm{T}$.
Déterminons la dimension des différentes expressions proposées et comparons le résultat à la dimension de la période T.

a. $\dim\left(2\pi\sqrt{\frac{g}{L}}\right) = \sqrt{\frac{\dim(g)}{\dim(\mathrm{L})}} = \sqrt{\frac{\mathrm{LT}^{-2}}{\mathrm{L}}} = \mathrm{T}^{-1} \neq \mathrm{T}$.

b. $\dim\left(2\pi\sqrt{\frac{L}{m}}\right) = \sqrt{\frac{\dim(L)}{\dim(m)}} = \sqrt{\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{M}}} \neq T$.

c. $\dim\left(2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}\right) = \sqrt{\frac{\dim(L)}{\dim(g)}} = \sqrt{\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{LT}^{-2}}} = \mathrm{T}$.

On en déduit que l'expression $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ est l'expression correcte.

EXERCICES S'entraîner

19. Exercice résolu dans le manuel

20. Application de l'exercice résolu

1. Le travail du poids du skieur entre le départ et l'arrivée de la course ne dépend que de la différence d'altitude entre le point de départ A et le point d'arrivée B, il est indépendant du chemin suivi. Le travail est donc égal à :
$\mathscr{W}_{AB}(\vec{P}) = mg\,(z_{\text{départ}} - z_{\text{arrivée}}) = 90 \times 9{,}81 \times 870$
$\mathscr{W}_{AB}(\vec{P}) = 7{,}7 \times 10^5$ J.

2. La variation d'énergie potentielle de pesanteur du skieur entre le départ et l'arrivée de la course est égale à l'opposé du travail du poids du skieur.
Ainsi, $\mathscr{E}_{ppB} - \mathscr{E}_{ppA} = -7{,}7 \times 10^5$ J.

3. Si on néglige les frottements, l'énergie mécanique se conserve : $\mathscr{E}_{mA} = \mathscr{E}_{mB}$.
La valeur de la vitesse du skieur est nulle au départ, donc $\mathscr{E}_{mA} = \mathscr{E}_{ppA}$.
De plus, $\mathscr{E}_{mB} = \frac{1}{2} m v_B^2 + \mathscr{E}_{ppB}$.
Ainsi, comme $\mathscr{E}_{mA} = \mathscr{E}_{mB}$, $\mathscr{E}_{ppA} = \frac{1}{2} m v_B^2 + \mathscr{E}_{ppB}$.
D'où : $\frac{1}{2} m v_B^2 = \mathscr{E}_{ppA} - \mathscr{E}_{ppB}$

$v_B^2 = \frac{2 \times (\mathscr{E}_{ppA} - \mathscr{E}_{ppB})}{m}$.

$v_B = \sqrt{\frac{2 \times (\mathscr{E}_{ppA} - \mathscr{E}_{ppB})}{m}}$.

A. N. : $v_B = \sqrt{\frac{2 \times 7{,}7 \times 10^5}{90}} = 1{,}3 \times 10^2$ m·s^{-1}

($v_B = 1{,}3 \times 10^2 \times 3{,}6 = 4{,}7 \times 10^2$ km·h^{-1}).

Le record du monde de vitesse à ski était égal à 255 km·h^{-1} en 2016.
La valeur de la vitesse calculée est donc irréaliste car on ne peut pas négliger les frottements en réalité.

21. Exercice résolu dans le manuel

22. Application de l'exercice résolu

1. Une horloge atomique de dernière génération a une précision p égale à :

$$p = 10^{-11} \text{ s par jour} = \frac{10^{-11}}{24 \times 3600} = 10^{-16}.$$

Le rapport r de l'épaisseur d'un cheveu sur la distance moyenne Terre-Soleil est égal à :

$$r = \frac{50 \times 10^{-6}}{150 \times 10^9} = 3{,}3 \times 10^{-16}.$$

La précision des horloges atomiques de dernière génération est donc bien dans le même rapport que l'épaisseur d'un cheveu sur la distance moyenne Terre-Soleil.

2. Une horloge atomique commerciale a une précision p' égale à :
$p' = 10^{-8}$ s par jour $= \frac{10^{-8}}{24 \times 3600} = 10^{-13}$. Si on compare cette précision, c'est-à-dire ce rapport, à la distance moyenne Terre-Soleil d, on trouve une longueur l égale à :
$l = p' \times d = 10^{-13} \times 150 \times 10^9 = 10^{-2}$ m.
Cette longueur d'un centimètre peut correspondre à l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'une tablette par exemple.
Ainsi, on peut dire que la précision des horloges atomiques commerciales au césium est dans le même rapport que l'épaisseur d'une tablette sur la distance moyenne Terre-Soleil.

23. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. La balle est le système dont on étudie le mouvement. On choisit le référentiel terrestre.

Lorsque la balle est lancée, elle est soumise à la seule action du poids (les forces dues à l'air sont considérées comme nulles). Le système est donc conservatif.

D'après la loi de conservation de l'énergie, l'énergie mécanique $\mathscr{E}_{mA}$ de la balle en A est égale à l'énergie mécanique $\mathscr{E}_{mB}$ de la balle au point B.

On choisit l'origine de l'énergie potentielle de pesanteur à l'altitude du point A : $\mathscr{E}_{ppA} = 0$.

$$\mathscr{E}_{mA} = \mathscr{E}_{ppA} + \mathscr{E}_{cA} = 0 + \frac{1}{2} m v_0^2$$

(en supposant que la balle est lancée sans effet de rotation)

Au point B le plus haut atteint par la balle, la balle s'est élevée de h au-dessus du point A et la valeur de sa vitesse est nulle : $v_B = 0$. On a alors : $\mathscr{E}_{mB} = \mathscr{E}_{ppB} = mgh$.

De la loi de conservation ($\mathscr{E}_{mA} = \mathscr{E}_{mB}$), on déduit :

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = mgh \quad \text{soit} \quad h = \frac{v_0^2}{2g}$$

A. N. : $h = \dfrac{6{,}0^2}{2 \times 9{,}81} = 1{,}8$ m.

b. Appelons $h' = 1{,}5$ m la différence d'altitude entre B' et A.

En B', la valeur de la vitesse de la balle est nulle.

Ainsi, $\mathscr{E}_{mB'} = \mathscr{E}_{ppB'} + \mathscr{E}_{cB'} = mgh' + \dfrac{1}{2} m v_{B'}^2 = mgh'$

D'où :

$\Delta\mathscr{E}_m = \mathscr{E}_{mB'} - \mathscr{E}_{mA} = \mathscr{E}_{mB'} - \mathscr{E}_{mB} = mgh' - mgh = mg(h' - h)$

On déduit :

$\Delta\mathscr{E}_m = 1{,}5 \times 10^{-1} \times 9{,}81 \times (1{,}5 - 1{,}8) = -0{,}44$ J.

Dans la réalité, de l'énergie est transférée vers l'extérieur par les forces de frottement qui sont non conservatives.

24. Déménagement

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. Le travail de la force $\vec{F}$ exercée par le déménageur pour déplacer l'armoire sur une longueur $L = 5$ m de A à B est égal à : $\mathscr{W}_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$

Comme $\vec{F}$ et $\overrightarrow{AB}$ ont même direction et même sens :

$\mathscr{W}_{AB}(\vec{F}) = F \times L$ soit $\mathscr{W}_{AB}(\vec{F}) = 4 \times 10^2 \times 5 = 2 \times 10^3$ J.

b. Le travail est positif : il est moteur car il favorise le déplacement de l'armoire.

c. Le poids $\vec{P}$ de l'armoire est une force verticale donc toujours orthogonale au déplacement horizontal $\overrightarrow{AB}$. Le travail du poids $\mathscr{W}_{AB}(\vec{P})$ qui s'exprime par le produit scalaire $\vec{P} \cdot \overrightarrow{AB}$ est donc nul : $\mathscr{W}_{AB}(\vec{P}) = 0$ J.

d. Comme le travail du poids de l'armoire est nul, l'énergie potentielle de pesanteur de l'armoire ne varie pas au cours de son mouvement.

25. Traîneau sur la neige

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. Travail de la force de traction :

$\mathscr{W}_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \times \overrightarrow{AB} = F \times L \cos\theta$

soit : $W_{AB}(\vec{F}) = 2{,}0 \times 10^2 \times 350 \times \cos(10) = 6{,}9 \times 10^4$ J.

Ce travail est positif, donc moteur.

b. Travail de la force de frottement :

$\mathscr{W}_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \times \overrightarrow{AB} = -f \times L$

soit : $\mathscr{W}_{AB}(\vec{f}) = -1{,}7 \times 10^2 \times 350 = -6{,}0 \times 10^4$ J.

Ce travail est négatif, donc résistant.

26. Pendule et travail du poids

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. et b. On choisit par exemple l'origine des altitudes au point B soit $z_B = 0$.

Travail du poids entre A et B :

$\mathscr{W}_{AB}(\vec{P}) = mg(z_A - z_B) = m\,g\,l$

soit $\mathscr{W}_{AB}(\vec{P}) = 0{,}100 \times 9{,}81 \times 0{,}50 = 0{,}49$ J (travail moteur).

Travail du poids entre B et C :

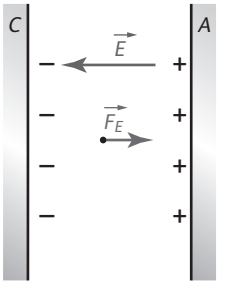
$\mathscr{W}_{BC}(\vec{P}) = mg(z_B - z_c) = -m\,g\,l = -0{,}49$ J (travail résistant).

Travail du poids entre A et C :

$\mathscr{W}_{AC}(\vec{P}) = mg(z_A - z_c) = 0$ J (travail nul).

c. Comme le pendule atteint une altitude z_c égale à son altitude initiale z_A, le pendule n'est soumis qu'à des forces conservatives. Il n'est donc pas soumis à des forces de frottements.

27. Canon à électrons



> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. Le champ $\vec{E}$ est uniforme entre l'anode et la cathode. Il est perpendiculaire aux plaques (cathode C et anode A).

• La force électrique qui s'exerce sur l'électron dans le champ électrique $\vec{E}$ est définie par :

$$\vec{F_E} = -e\vec{E}.$$

Ses caractéristiques sont :

– direction : perpendiculaire aux plaques comme $\vec{E}$;

– sens : celui du vecteur accélération $\vec{a}$ de la particule donc de la cathode vers l'anode ;

– valeur : $F = eE$.

• Les caractéristiques du champ électrique $\vec{E}$ sont :

– direction : perpendiculaire aux plaques ;

– sens opposé à la force électrique donc de l'anode vers la cathode ;

– valeur : E.

• Le signe des plaques A et C : le sens du champ électrique entre les deux plaques va de la plaque chargée positivement vers la plaque chargée négativement. Ici, A est chargée positivement et C négativement.

b. Le travail de la force électrostatique $\vec{F_E}$ pour un déplacement de l'électron de la plaque C à la plaque A est égal à :

$$\mathscr{W}_{CA}(\vec{F_E}) = -eU_{CA} = eU_{AC} = eU.$$

c. La force électrique est une force conservative car son travail ne dépend pas du chemin suivi par l'électron entre les deux plaques.

28. ★ Étude énergétique d'un pendule simple

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. L'énergie potentielle de pesanteur s'exprime par $\mathscr{E}_p = mgz$ avec z l'altitude du point matériel :

$$z = OH = l - l \times \cos\theta = l \times (1 - \cos\theta)$$

On a donc :

$$\mathscr{E}_{pp} = mgl \times (1 - \cos\theta)$$

b. L'amplitude correspond à la valeur maximale θ_{max} de l'élongation θ. Quand le pendule est dans sa position d'altitude maximale, θ est maximal et l'énergie potentielle du pendule est maximale.

On a alors $\mathscr{E}_{ppmax} = 29$ mJ.

$$\mathscr{E}_{ppmax} = \frac{m\,g}{1 - \cos\theta_{max}}.$$

Soit : $\cos\theta_{max} = 1 - \dfrac{\mathscr{E}_{ppmax}}{mgl}$.

On en déduit : $\cos\theta_{max} = 1 - \dfrac{29 \times 10^{-3}}{0{,}20 \times 9{,}81 \times 0{,}50} = 0{,}97.$

Soit : $\theta_{max} = \cos^{-1}\left(1 - \dfrac{29 \times 10^{-3}}{0{,}20 \times 9{,}81 \times 0{,}50}\right) = 14^\circ.$

c. $\mathscr{E}_m = \mathscr{E}_c + \mathscr{E}_{pp}$.

Quand $\theta = \theta_{max}$ on a : $\mathscr{E}_{pp} = 29$ mJ et $\mathscr{E}_c = 0$ J.

L'énergie mécanique $\mathscr{E}_m$ vaut donc 29 mJ.

Au passage par la position d'équilibre $z = 0$, l'énergie potentielle est nulle : $\mathscr{E}_{pp} = 0$ J.

L'énergie cinétique vaut alors $\mathscr{E}_c = 29$ mJ.

La valeur de la vitesse de passage v_0 de S en O est donc égale à :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\mathscr{E}_c}{m}} \quad \text{soit} \quad v_0 = \sqrt{\frac{2 \times 29 \times 10^{-3}}{0{,}20}} = 0{,}54 \text{ m·s}^{-1}.$$

d. $\theta_{max} = 14^\circ$: les oscillations ont une amplitude inférieure à 20°, cette amplitude est donc considérée ici comme faible.

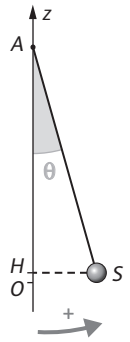
$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{0{,}50}{9{,}81}} = 1{,}4 \text{ s}.$$

La période des oscillations est deux fois plus grande que celle de l'énergie $\mathscr{E}_c$ (ou $\mathscr{E}_{pp}$). En effet au cours de chaque oscillation, le pendule passe deux fois par sa position d'altitude maximale ($\mathscr{E}_c = 0$ et $\mathscr{E}_{ppmax}$) et deux fois par sa position d'altitude minimale ($\mathscr{E}_{cmax}$ et $\mathscr{E}_{pp} = 0$).

29. In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Lorsque deux nageurs réalisent leur épreuve dans des « temps » avec un écart inférieur à 1/100 s, l'affichage les crédite du même temps : ils apparaissent alors ex–æquo sur l'affichage alors qu'en réalité, ils ne sont pas ex–æquo.



b. L'écart en distance ΔL (en supposant la valeur de la vitesse des nageurs égale à leur vitesse moyenne $v_{moy} = \dfrac{100}{52{,}76} = 1{,}895 \text{ m·s}^{-1}$) pendant une durée $\Delta t = 1$ ms serait de :

$\Delta L = v_{moy} \times \Delta t$

$\Delta L = 1{,}9 \times 10^{-3}$ m $= 1{,}9$ mm.

c. La précision est de 1/100 s sur 52,76 s soit une précision de 2×10^{-4}.

d. L'écart de temps τ dû à un couloir plus court de 1,0 cm représente la durée pour parcourir deux fois cette distance (deux longueurs de piscine) à la vitesse de valeur 1,895 m·s^{-1} soit :

$$\tau = \frac{2{,}0 \times 10^{-2}}{1{,}895} = 11 \text{ ms}.$$

Ce résultat permet de comprendre pourquoi une piscine olympique doit être construite avec une très grande précision !

30. ★ Mesure expérimentale de période

> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider.**

a. Les valeurs mesurées ne sont pas toutes égales à cause des incertitudes expérimentales inhérentes à toutes mesures.

Les sources d'erreurs possibles sont :

– l'expérimentateur : décalage aux instants du déclenchement et d'arrêt du chronomètre, choix de la position de déclenchement (élongation maximale, élongation nulle), observation correcte ou pas, comptage correct ou non ;

– l'appareil de mesure ;

– le pendule : allongement de la longueur du fil entre deux mesures.

b. Tableau des valeurs :

T(s)	1,33	1,28	1,31	1,30	1,33	1,29
	1,30	1,31	1,33	1,34	1,28	1,32

Avec la fonction statistique d'un tableur ou d'une calculatrice on obtient :

– la valeur moyenne de la période : $T_{moy} = 1{,}31$ s ;

– la valeur de l'écart type expérimental : $s_{exp} = 0{,}02$ s ;

– la valeur de l'incertitude de mesure pour un niveau de confiance de 95 % : $U(T) = 0{,}01$ s.

Le résultat de la mesure s'écrit alors : $T = 1{,}31 \pm 0{,}01$ s.

31. ★ S'auto-évaluer

En l'absence de frottement, le système pendule est conservatif : son énergie mécanique est constante au cours des oscillations et conserve la valeur $\mathscr{E}_{m0} = 8{,}5$ mJ qu'il a à $t_0 = 0$ s.

Lorsque le système est soumis à des frottements, il échange de l'énergie avec l'extérieur et son énergie mécanique diminue. La variation de son énergie mécanique $\Delta\mathscr{E}_m$ est égale à l'énergie échangée avec l'extérieur, soit le travail des forces de frottement.

On a : $\Delta\mathscr{E}_m = \mathscr{W}(\overrightarrow{f_{frot}})$.

La durée T de la première oscillation du pendule correspond à 2 pseudo–périodes pour l'énergie potentielle (ou cinétique). On lit $T = 1{,}2$ s.

À $t = 1{,}2$ s, l'énergie mécanique est égale à : $\mathscr{E}_m = 5{,}5$ mJ.

On obtient alors :

$\Delta\mathscr{E}_m = \mathscr{W}(\overrightarrow{f_{frot}}) = 5{,}5 - 8{,}5 = -3{,}0$ mJ

Le rapport en valeur absolue du travail des forces de frottement et de l'énergie mécanique est :

$$r = \frac{3{,}0}{8{,}5} = 35 \text{ %}$$

Ainsi, après une oscillation du pendule, 35 % de l'énergie mécanique initiale du pendule a été transférée vers l'extérieur par le travail des forces de frottements.

32. ★★ Force électrique conservative

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Pour que la valeur de la vitesse de la particule augmente pendant la traversée de *A* vers *B*, le vecteur accélération $\vec{a}$ de la particule doit être orienté de la plaque *A* vers la plaque *B* comme la force électrique $\vec{F_E} = m\vec{a}$.
Étant donné que la charge de cette particule est négative, les caractéristiques du champ électrique $\vec{E}$ sont :
– sa direction : perpendiculaire aux plaques ;
– son sens : vers la plaque *A* ;
– sa valeur : $E = \dfrac{U}{d}$.
Le sens du champ $\vec{E}$ va de la plaque positive vers la plaque négative : on en déduit que la plaque *A* est chargée négativement et la plaque *B* positivement. On a donc $U = U_{BA}$.

b. $\mathcal{W}_{AB}(\vec{f_e}) = -qU_{AB} = -qU_{BA} = -qU$.

c. Dans un condensateur plan, la force électrique est conservative. Comme pour le poids dans un champ de pesanteur uniforme, la relation entre le travail de la force et l'énergie potentielle électrique est :
$\mathcal{W}_{AB}(\vec{f_e}) = -qU = \mathscr{E}_{pA} - \mathscr{E}_{pB}$.
En choisissant l'origine des potentiels en *A* ($\mathscr{E}_{pA} = 0$), on trouve que $\mathscr{E}_{pB} = qU$.

d. et e. L'énergie mécanique de la particule se conserve. On en déduit : $\mathscr{E}_{pA} + \mathscr{E}_{cA} = \mathscr{E}_{pB} + \mathscr{E}_{cB}$.
Comme $\mathscr{E}_{pA} = 0$ et $\mathscr{E}_{pB} = qU$, on trouve que : $\mathscr{E}_{cA} = qU + \mathscr{E}_{cB}$
d'où : $\mathscr{E}_{cB} = \mathscr{E}_{cA} - qU$
ainsi : $\dfrac{1}{2}mv_B^2 = \dfrac{1}{2}mv_0^2 - qU$

$v_B = \sqrt{v_0^2 - \dfrac{2qU}{m}}$.

Si $v_0 = 0$, on obtient : $v_B = \sqrt{\dfrac{2qU}{m}}$.

A.N. :

$v_B = \sqrt{\dfrac{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 700}{9{,}1 \times 10^{-31}}} = 1{,}6 \times 10^7 \text{ m·s}^{-1}$.

33. Localisation par satellite

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Nous avons choisi de faire travailler les élèves sur le principe et les applications de la localisation par satellites car ce sujet permet de faire le lien avec les horloges atomiques et il est omniprésent dans la vie quotidienne. Les documents proposés permettent de trouver le principe de la géolocalisation par satellite (le GPS) et d'avoir des précisions sur les horloges atomiques embarquées (texte sur les applications du système Galileo).
Dans la synthèse sur le principe de la localisation par satellites, on doit retrouver que :
– quatre satellites sont nécessaires pour la localisation dans l'espace ;
– la mesure de la distance entre le point à localiser et chaque satellite est liée à la mesure d'une durée ;
– la mesure de la durée doit avoir une précision atomique (horloges atomiques embarquées sur les satellites et synchronisation des horloges à quartz des utilisateurs).
Le développement de ces deux derniers points permet de traiter le rôle des horloges embarquées sur les satellites.
Remarques :
– bien que la question des applications ne soit pas à traiter dans le cadre de cet exercice de synthèse, elle peut être l'objet d'une discussion en classe ;
– la vidéo en anglais *Galileo, time and space*, disponible sur le site Internet de l'ESA, est très intéressante.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

34. LA MESURE DU TEMPS PAR GALILÉE

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, valider.**

1. a. Analyses dimensionnelles des expressions de la période propre T_0 du pendule proposées dans le document 1 :
$\dim(2\pi\sqrt{l}) = \dim(\sqrt{l}) = \sqrt{\mathsf{L}} \neq \mathsf{T}$

$\dim\left(2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}\right) = \sqrt{\dfrac{\dim(l)}{\dim(g)}} = \sqrt{\dfrac{\mathsf{L}}{\mathsf{LT}^{-2}}} = T$

$\dim\left(2\pi\sqrt{\dfrac{g}{l}}\right) = \sqrt{\dfrac{\dim(g)}{\dim(l)}} = \sqrt{\dfrac{\mathsf{LT}^{-2}}{\mathsf{L}}} = \mathsf{T}^{-1} \neq \mathsf{T}$

$\dim\left(2\pi\sqrt{\dfrac{m}{l}}\right) = \sqrt{\dfrac{\dim(m)}{\dim(l)}} = \sqrt{\dfrac{\mathsf{M}}{\mathsf{L}}} \neq \mathsf{T}$.

On en déduit que l'expression $T_0 = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$ est l'expression correcte.

b. La valeur calculée *T* de la période du pendule réalisé est égale à : $T = T_0 = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$.

A. N. : $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{2{,}3}{9{,}81}} = 3{,}0$ s.

D'après le document 2, la valeur mesurée expérimentalement T' de la période du pendule est telle que : $5\,T' = 15$ s.
D'où $T' = 3{,}0$ s.
On retrouve bien : $T = T'$.

2. a. D'après le document 2, la valeur de l'abscisse maximale est égale à : $x_m = 400$ mm.
D'après le document 1, l'angle maximal α_m est tel que :
$\sin(\alpha_m) = \dfrac{x_m}{l}$.
D'où : $\alpha_m = \sin^{-1}\left(\dfrac{x_m}{l}\right)$.

A. N. : $\alpha_m = \sin^{-1}\left(\dfrac{0{,}400}{2{,}3}\right) = 10°$.

b. L'énergie cinétique maximale est égale à :

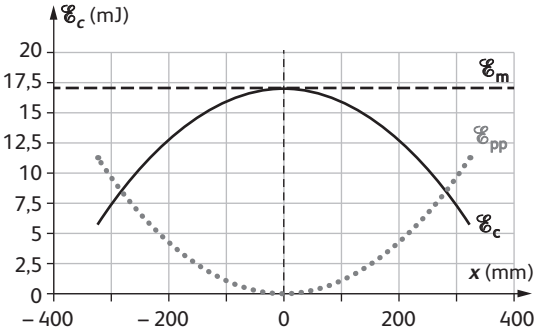
$\mathscr{E}_{cmax} = \frac{1}{2} m v_m^2$.

D'où : $v_m = \sqrt{\frac{2\mathscr{E}_{cmax}}{m}}$.

D'après le document 2, l'énergie cinétique maximale vaut : $\mathscr{E}_{cmax} = 17{,}3$ mJ.

A. N. : $v_m = \sqrt{\frac{2 \times 17{,}3 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-3}}} = 0{,}83$ m·s^{-1}.

c. Si on considère qu'il n'y a pas de frottements, l'énergie mécanique $\mathscr{E}_m$ du pendule se conserve.
De plus, il y a conversion de l'énergie cinétique $\mathscr{E}_c$ en énergie potentielle de pesanteur $\mathscr{E}_{pp}$.



35. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

La mesure du temps au cours des siècles

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Face aux limites des techniques, les Hommes se sont adaptés pour concevoir des instruments de mesure du temps de plus en plus précis.
Voir le tableau en bas de page.

36. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Une nouvelle façon de se poser sur Mars

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

• **Variation de l'énergie mécanique $\Delta\mathscr{E}_m$ de l'étage de descente.**

Lors de la séparation de l'étage de descente avec la capsule :
$\mathscr{E}_{mA} = \mathscr{E}_{cA} + \mathscr{E}_{ppA}$ avec $\mathscr{E}_c$ l'énergie cinétique et $\mathscr{E}_{pp}$ l'énergie potentielle de pesanteur de la capsule.

$\mathscr{E}_{mA} = \frac{1}{2} m_d v_A^{\,2} + m_d g z_A$.

Au début de la descente du *rover* :

$\mathscr{E}_{mB} = \frac{1}{2} m_d v_B^2 + m_d g z_B$.

Ainsi, $\Delta\mathscr{E}_m = \mathscr{E}_{mB} - \mathscr{E}_{mA} = \frac{1}{2} m_d (v_B^2 - v_A^2) + m_d g(z_B - z_A)$.

A.N. :

$\Delta\mathscr{E}_m = \frac{1}{2} \times 2{,}0 \times 10^3 \times (0{,}75^2 \times 100^2) + 2{,}0 \times 10^3 \times 3{,}7 \times (20 - 2 \times 10^3) = -2 \times 10^7$ J.

Tableau de l'exercice 35 :

	De la Préhistoire à l'Antiquité	Du XXIII^{e} au XX^{e} siècle en Europe	Au début du XX^{e} siècle	Depuis le milieu du XX^{e} siècle
Instruments de mesure du temps	observation du ciel ; alignements de pierres du néolithique ; cadrans solaires	oscillateurs mécaniques associés à des systèmes permettant de compenser le phénomène d'amortissement des oscillations	horloges à quartz	horloges atomiques
Techniques utilisées	Ces instruments se basent sur les positions du Soleil et de la Lune dans le ciel.	Ces instruments se basent sur la mesure de la durée des oscillations d'un pendule.	Ces instruments se basent sur la mesure de l'oscillation d'un cristal de quartz excité par un courant électrique.	Ces instruments se basent sur la mesure de la fréquence des radiations de transitions électroniques d'atomes, comme le césium 133.
Avantages, inconvénients et/ou améliorations	Ces instruments sont très imprécis. Ils indiquent l'heure locale et sont soumis aux aléas climatiques et à l'alternance jour/nuit. La graduation du cadran solaire et l'orientation de sa tige se sont toutefois perfectionnées au cours des siècles.	La mesure du temps est plus précise qu'avec un cadran solaire et les oscillateurs mécaniques fonctionnent aussi bien le jour que la nuit. La durée d'une oscillation dépend cependant de la température, de l'usure de l'instrument ou du lieu où il se trouve. De plus, ces oscillateurs sont encombrants. Il a fallu remplacé les « poids » par des ressorts de petite taille pour qu'ils puissent être transportés facilement.	Une horloge à quartz est très précise : elle dérive seulement d'une seconde tous les 6 ans. Elle est encore largement utilisée aujourd'hui, dans les montres que l'on porte au poignet notamment. Cette précision est cependant trop faible pour les systèmes de navigation comme le GPS par exemple.	Les atomes de césium 133 sont tous identiques : ils ne s'usent pas, contrairement à un oscillateur mécanique par exemple. La fréquence des radiations de transitions électroniques d'atomes est donc universelle et immuable. Avec ces horloges, le temps est donc devenu universel et c'est sa mesure qui permet de déterminer la position des objets grâce au GPS.

$\mathscr{E}_{mB} < \mathscr{E}_{mA}$: l'énergie mécanique de la capsule diminue au cours de la descente. En effet, une partie de cette énergie est dissipée sous forme d'énergie thermique en raison des frottements subis par le système. De plus, les forces de poussée des moteurs effectuent elles aussi un travail résistant ($\mathscr{W}_{AB} < 0$).

• **Durée Δt de la phase de descente du rover entre le moment où la grue commence à descendre le *rover* et son atterrissage sur le sol martien**

Deux hypothèses doivent être posées :

– le *rover* descend à vitesse de valeur constante $v = 0{,}75\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

– les filins de longueur $l = 7{,}50$ m se déroulent pendant la descente du *rover*.

Ainsi, la valeur de la vitesse du rover est égale à :

$v = \dfrac{d}{\Delta t}$ avec d la distance parcourue par le *rover*.

On trouve que : $d = D - l - h$

avec :

– D la distance entre la grue et le sol au début de la descente du rover : $D = 20$ m ;

– l la longueur des filins : $l = 7{,}50$ m ;

– h la hauteur du rover : $h = 2{,}2$ m.

La durée Δt de la phase de descente du *rover* entre le moment où la grue commence à descendre le *rover* et son atterrissage sur le sol martien est donc égale à :

$$\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{D - l - h}{v}$$

A. N. : $\Delta t = \dfrac{20 - 7{,}50 - 2{,}2}{0{,}75} = 14$ s.

37. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

La danse des pendules

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site : sirius.nathan.fr/sirius 2017

Remarque : cette ECE correspond au sujet zéro n° 3 publié en 2014 sur le site :
http://eduscol.education.fr/physique-chimie

CHAPITRE

11

COMPRENDRE

Relativité du temps

> Manuel pages 244 à 263

Choix pédagogiques

Après une analyse de la mesure du temps d'un point de vue classique, ce chapitre reconsidère la notion de temps et constitue une ouverture vers la physique contemporaine. Le projet est modeste mais présente cependant des difficultés incontournables quand il s'agit de remettre en cause des notions fortement ancrées dans les esprits.
On sait que l'invention de la théorie de la relativité repose sur l'invariance de la vitesse de la lumière (et des ondes électromagnétiques en général) dans le vide. À partir de cette constatation, il est apparu que la notion de temps, en tant que réalité commune à tout l'Univers, devait être reconsidérée. On doit à Einstein la finalisation d'une nouvelle théorie cohérente mais l'enseignant ne devrait pas oublier, sans faire d'ombre au génie de ce savant, que la théorie de la relativité est aussi le fruit des travaux d'autres physiciens ou mathématiciens, en particulier Poincaré et Lorentz.
Après avoir énoncé le principe de l'invariance de la célérité de la lumière dans le vide et les postulats d'Einstein, le cours donne, en s'appuyant sur un calcul présenté en activité, la relation entre durée propre et durée mesurée. Nous avons choisi d'introduire la notion de référentiel propre qui n'est pas mentionnée dans le programme mais qui, à l'usage, nous a paru commode pour traiter la notion de durée propre avec un vocabulaire rigoureux.
Dans un dernier paragraphe, nous mentionnons les preuves expérimentales en même temps que les situations où la relativité du temps doit être prise en compte. Pour cela, nous avons opté pour un classement des situations suivant les vitesses concernées : vitesses proches de c (autrement dit, vitesses relativistes) ce qui concerne en fait la physique des particules ; vitesses petites devant c.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Affiche du film *Interstellar*

Dans le film Interstellar, après un voyage dans l'espace, un père revient auprès de sa fille, désormais plus âgée que lui. Comment le film explique-t-il cela ?

La photographie reproduit une affiche du film. Dans cette œuvre de fiction, le personnage principal retrouve sa fille après un long voyage. Il est alors plus âgé qu'elle. Dans cette fiction, c'est en réalité davantage la relativité générale qui est mise en jeu puisque le vaisseau spatial s'approche d'un trou noir. L'illustration permet néanmoins d'introduire de manière attractive la non universalité du temps en physique.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
La célérité de la lumière, un défi au sens commun

Commentaires

Il nous a paru important d'introduire la relativité du temps en montrant que les faits expérimentaux ont joué un rôle essentiel dans l'invention de cette théorie pourtant hautement abstraite. Les expériences de Michelson et Morley n'ont certainement pas été le déclencheur de la démarche d'Einstein mais elles présentent toutefois un intérêt historique et pédagogique tel qu'il est difficile de les ignorer dans une introduction à la relativité restreinte.
Il faut signaler aux élèves qu'il existe bien d'autres expériences que celles de Michelson et Morley pour vérifier directement l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, mais il nous semble peu pertinent de multiplier les exemples auprès des élèves. Les commentaires du programme signalent les expériences d'Arago (1810), Alväger (1964), Hall et Brillet (1979) ainsi que l'observation des étoiles doubles.
– Arago, s'appuyant sur une théorie corpusculaire de la lumière, pense pouvoir mettre en évidence la vitesse de la lumière des étoiles par rapport à la Terre en étudiant sa réfraction par un prisme. En effet, il admet que la déviation de la lumière, qui dépend de sa vitesse dans les milieux traversés, doit être influencée par sa vitesse initiale, à l'entrée du prisme.
– L'expérience de Hall et Brillet consiste à détecter d'éventuelles variations de la fréquence de résonance d'une cavité Fabry-Perot en fonction de son orientation.
Les deux autres expériences citées concernent l'indépendance du mouvement de la source sur la célérité de la lumière. À noter que cette indépendance est inhérente

aux phénomènes ondulatoires, ce n'est pas une particularité de la lumière.
– L'observation des étoiles doubles devrait faire apparaître des irrégularités de trajectoires si la lumière de l'étoile, entraînée par sa source, se propageait plus vite lorsque celle-ci se rapproche de la Terre que lorsqu'elle s'en éloigne.
– L'expérience d'Alväger consiste à mesurer la vitesse des rayons g produits par la désintégration de pions neutres se déplaçant à des vitesses proches de *c*.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Michelson et Morley ont essayé de démontrer que le mouvement de la Terre avait une influence sur la vitesse de propagation de la lumière mesurée dans le référentiel terrestre.
Remarque pour le professeur : les expériences de Michelson et Morley n'étaient pas destinées à vérifier que la vitesse de la lumière est invariante mais bien à mesurer l'influence du déplacement de la Terre par rapport à l'éther dont l'existence n'était pas mise en cause à l'époque. Toutefois, nous n'avons évoqué à aucun moment la théorie de l'éther très intéressante du point de vue historique mais qui pourrait brouiller encore plus la réflexion de nos élèves déjà mise à rude épreuve par cette partie du programme.

RÉALISER

2. a. Remarque : les valeurs de *D*, de l'ordre de celle qui est donnée dans l'énoncé, étaient obtenues en faisant effectuer par réflexion plusieurs allers et retours aux rayons avant leur interférence.
La relation de départ est :

$$\tau = \frac{Dv^2}{c^3}$$

$$\dim \tau = \frac{\dim (Dv^2)}{\dim (c^3)} = \frac{\dim D \times (\dim v)^2}{\dim (c^3)}$$

Comme *v* et *c* ont la même dimension, celle d'une vitesse soit LT^{-1}, on peut écrire :

$$\dim \tau = \frac{L}{LT^{-1}} = T$$

b. Différence de durées de parcours :
$\Delta\tau = 3{,}3 \times 10^{-16}$ s.
Période de la radiation $T = \frac{\lambda}{c} = 1{,}7 \times 10^{-15}$ s ; $\Delta\tau = 0{,}20T$.

ANALYSER

3. a. Le décalage temporel obtenu dans la question **2. b.** n'est pas directement mesurable. Par contre, il entraîne un décalage du système de franges de 1/5 interfrange, ce qui est facilement mesurable et justifie l'intérêt du dispositif d'interférences pour mesurer le décalage attendu.
b. La vitesse de la lumière mesurée sur la Terre ne dépend pas du mouvement de celle-ci. En extrapolant les résultats de cette expérience, il est possible d'émettre l'hypothèse suivante : la célérité de la lumière dans le vide ne dépend pas du mouvement de la source.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
À chacun son temps

Commentaires

Cette activité présente une démonstration devenue classique de la relation entre les temps mesurés dans deux référentiels, le référentiel propre et un référentiel en mouvement rectiligne uniforme par rapport au précédent.
On peut compléter l'activité en abordant deux autres problèmes :
– En imaginant un deuxième miroir placé au niveau de *A*, le dispositif constitue l'oscillateur d'une « horloge de lumière ». Sur le quai de la gare, un observateur pourrait comparer la durée d'une oscillation de cette horloge avec celle d'une horloge parfaitement identique immobile par rapport au quai. Comme il mesure une durée plus longue pour la période de l'horloge du train, il en conclura que celle-ci va retarder par rapport à celle du quai, comme si son mécanisme était ralenti.
– Si on se place du point de vue d'un observateur immobile dans le wagon, c'est la gare qui se déplace à la vitesse *v* et les conclusions sont identiques. Il y a réciprocité de la dilatation des durées.

Réponses

ANALYSER

1. a. Dans le référentiel de la gare, le miroir et les récepteurs se déplacent à la vitesse *v*. Lorsque l'éclair atteint le miroir, celui-ci a parcouru la distance $v \times \frac{\Delta t}{2}$. Le récepteur parcourt encore la distance $v \times \frac{\Delta t}{2}$ pendant que l'éclair se propage du miroir au récepteur.
b. Dans le référentiel de la gare, le trajet de l'éclair est plus grand que dans le référentiel du wagon. Or il est parcouru à la même vitesse *c*. Donc la durée du parcours mesuré par l'horloge de la gare est plus grande.

RÉALISER

2. a. $h = \frac{c\Delta t_{\text{wagon}}}{2}$.

b. $AA' = v \times \Delta t_{\text{gare}}$; $AM = A'M = c\frac{c\Delta t_{\text{gare}}}{2}$.

En appliquant le théorème de Pythagore :

$$AM = A'M = \sqrt{h^2 - \left(\frac{AA'}{2}\right)^2}.$$

c. En remplaçant *AM*, *h* et *AA'* par leurs expressions trouvées en **a.** et **b.** :

$$c \times \frac{c\Delta t_{\text{gare}}}{2} = \sqrt{\left(c \times \frac{\Delta t_{\text{wagon}}}{2}\right)^2 + \left(v \times \frac{\Delta t_{\text{gare}}}{2}\right)^2}$$

d'où :

$c^2 \Delta t^2_{\text{gare}} = (c\Delta t_{\text{wagon}})^2 + (v\Delta t_{\text{gare}})^2$;

$\Delta t^2_{gare} = (c^2 - v^2) = \Delta t^2_{wagon} c^2$;

$\Delta t^2_{gare} = \dfrac{\Delta t^2_{wagon}}{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}$ d'où le résultat annoncé.

VALIDER

3. Pour un observateur immobile sur le quai de la gare, le wagon et le dispositif émetteur-récepteur sont en mouvement. Pour le phénomène constitué par l'aller-retour de l'éclair, cet observateur mesure une durée plus grande que s'il était dans le wagon. Il constate donc une dilatation de la durée du phénomène qui se produit dans le wagon en mouvement.
Contrairement à la notion classique du temps, le résultat de la durée d'un phénomène dépend du référentiel dans lequel s'effectue cette mesure. Le temps a donc un caractère relatif vis-à-vis du référentiel de mesure.

3. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Relativité du temps à l'épreuve de l'expérience

Commentaires

On étudie ici l'expérience classique des muons cosmiques qui fut la première confirmation expérimentale de la théorie d'Einstein.

Réponses

CONNAÎTRE

1. Les durées, concernant les phénomènes liés à un muon, mesurées par un expérimentateur (dans le référentiel terrestre) sont plus grandes que les mêmes durées mesurées dans le référentiel lié à la particule.

RÉALISER

2. La durée Δt_p du parcours dans le référentiel de la particule est liée à la durée mesurée par :

$$\Delta t_p = \Delta t_m \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

soit :

$$\Delta t_p = 6{,}40 \times \sqrt{1 - \frac{0{,}995^2}{c^2}} = 6{,}4\ \mu s.$$

VALIDER

3. Les domaines d'incertitude de la valeur mesurée, 408 ± 9, et de la valeur calculée, 421 ± 8, ont une intersection commune, ce qui veut dire qu'à la précision des mesures les résultats théorique et expérimental sont en accord.

COMMUNIQUER

4. Les muons atmosphériques ont, selon la conception classique d'un temps universel, une durée de demi-vie telle que la plupart de ces particules devraient être désintégrées avant d'arriver au niveau de la mer. La relativité donne une explication cohérente : la durée du déplacement d'un muon dans le référentiel de la particule est plus petite que la durée mesurée dans le référentiel terrestre ; cette durée est assez courte pour qu'une faible partie des particules se désintègrent pendant le parcours. Le résultat de l'expérience est donc compatible avec la théorie de la dilatation des durées.

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Importance des effets relativistes

Commentaires

On se propose ici de trouver les critères permettant de distinguer les situations où la relativité du temps doit être prise en compte.

Réponses

ANALYSER

1. On a voulu faire apparaître l'écart très faible entre Δt_m et Δt_p. Si l'on avait utilisé une écriture décimale, il faudrait écrire ces valeurs avec un nombre de chiffres significatifs déraisonnable.

RÉALISER

2.

	$\dfrac{\Delta t_m - \Delta t_p}{\Delta t_m}$ (en %)
Marcheur	$5{,}6 \times 10^{-16}$
TGV	$3{,}3 \times 10^{-12}$
Avion de ligne	$3{,}5 \times 10^{-11}$
Satellite système GPS	$8{,}9 \times 10^{-9}$
Sonde solaire Helios 2	$2{,}7 \times 10^{-6}$
Particule α	$5{,}6 \times 10^{-6}$
Électron dans un microscope électronique	13
Proton dans l'accélérateur LHC (Europe)	100

VALIDER

3. a. La précision de la montre à quartz est insuffisante pour mesurer l'écart relativiste jusqu'aux vitesses concernant les engins les plus rapides construits par l'Homme.
La précision est juste suffisante pour mettre en évidence un écart dans le cas de la particule α.
L'écart est important, voire inacceptable, pour les deux derniers cas si l'on ne tient pas compte de la relativité du temps.
L'horloge atomique concernée ne permettrait pas de mesurer l'effet relativiste pour un TGV mais serait suffisamment précise pour le mesurer à la vitesse d'un avion de ligne et pour les engins ou particules plus rapides.
b. Pour chaque seconde écoulée sur l'horloge terrestre on accumule une différence de $8{,}9 \times 10^{-11}$ s, ce qui, au bout d'une heure de fonctionnement aboutit à un écart de $8{,}9 \times 10^{-11} \times 3600 = 3{,}2 \times 10^{-7}$ s.
Cet écart correspond à une distance de :
$3{,}2 \times 10^{-7} \times 3 \times 10^8 = 96$ m.
Ce n'est pas acceptable par un utilisateur.
c. L'importance de l'effet relativiste augmente avec la vitesse. La vitesse est un premier critère à prendre en compte.

Cependant, comme dans toute mesure physique, il faut aussi prendre en compte la précision de l'appareil de mesure.
Remarque pour le professeur : en physique des particules, on utilise plutôt des critères énergétiques en comparant les énergies avec l'énergie au repos.

EXERCICES Appliquer le cours

Les postulats de la relativité restreinte (§1 du cours)

11. Raisonner avec la célérité de la lumière
Il existe une vitesse limite, égale à la célérité c de la lumière dans le vide, qui ne peut être dépassée par aucun signal transportant une information, ni aucune particule.

12. Raisonner avec la célérité de la lumière
Non, c'est impossible car la célérité de la lumière dans le vide est indépendante de la source. La célérité mesurée sera donc c (si la mesure est effectuée dans le vide) quelle que soit la vitesse relative de l'étoile par rapport à la Terre.

13. Mesurer une valeur de vitesse
D'après les postulats d'Einstein, on ne peut pas concevoir d'expérience entièrement réalisée dans un référentiel galiléen permettant de savoir si celui-ci est en mouvement par rapport à un autre référentiel galiléen. On pourra rappeler que ceci résulte du postulat d'Einstein selon lequel les lois de la physique s'expriment de la même façon dans tous les référentiels galiléens.

Dilatation des durées (§2 du cours)

14. Définir la notion de temps propre
Une durée propre concernant une particule est une durée mesurée dans un référentiel dans lequel cette particule est immobile.

15. Raisonner avec la dilatation des durées
La relativité du temps n'intervient que si on compare plusieurs référentiels. Si le vaisseau constitue un référentiel galiléen, pour le cosmonaute il n'y a aucun changement dans les phénomènes observés par rapport à ce qui se produirait sur Terre dans les mêmes conditions. Il faudrait la même durée de cuisson, mesurée sur sa montre (les lois de la physique s'expriment de la même façon dans tous les référentiels galiléens, la durée de la cuisson aussi).

16. Différencier une durée propre et une durée mesurée
La durée propre est $1{,}2 \times 10^{-8}$ s.
La durée propre d'un phénomène est la valeur minimum des durées mesurées car le coefficient de dilatation des durées (γ) est toujours supérieur à 1, ou égal à 1 si la particule est immobile.

17. Comprendre la notion de durée propre
La durée mesurée est nécessairement supérieure à la durée propre. La seule valeur possible est $2{,}6 \times 10^{-7}$ s.

18. Savoir utiliser la loi de dilatation des durées
a. La durée de vie mesurée est :

$$\tau_m = \Delta t_m = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v_1}{c}\right)^2}} \times \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v_1}{c}\right)^2}} \times \tau$$

où τ désigne la durée de vie de la particule dans son référentiel propre.
Ainsi : $\tau_m = 6{,}6 \times 10^{-8}$ s.
b. Dans son référentiel propre, sa durée de vie est :

$$\tau = \tau_m \times \sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c}\right)^2} = 9{,}0 \times 10^{-11} \text{ s.}$$

c. La distance parcourue dans le référentiel du laboratoire sera :

$$d = v_2 \times \tau_m$$
$$= 0{,}98 \times 3{,}00 \times 10^8 \times 4{,}5 \times 10^{-10}$$
$$= 1{,}3 \times 10^{-1} \text{ m} = 13 \text{ cm.}$$

19. Communiquer et argumenter
Les particules des rayons cosmiques se déplacent à une vitesse si proche de celle de la lumière quelles peuvent traverser la galaxie avec une *durée propre* de quelques minutes seulement alors que, dans le référentiel terrestre, la *durée mesurée* de ce même trajet serait de plusieurs centaines de milliers d'années.

Confirmations expérimentales (§3 du cours)

20. Citer une preuve expérimentale
Citer l'expérience des muons cosmiques (voir activité 3).

21. Citer une application utile
La synchronisation des horloges terrestres et embarquées sur les satellites des systèmes GPS prend en compte la relativité du temps.

22. Tester la relativité du temps

$$\Delta t_p = 1 \text{ h}, \Delta t_m = \gamma \times \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \times \Delta t_p$$

$$\Delta t_m = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{100}{3{,}6 \times 3{,}00 \times 10^8}\right)^2}} \times 3\,600{,}00$$
$$= 1{,}00 \times 3\,600{,}00 \text{ s}$$
$$= 3\,600 \text{ s.}$$

Deux chronomètres précis au centième de seconde ne pourront mesurer aucune différence entre ces deux durées ! Ces vidéos sont évidemment truquées (d'autres problème se posent d'ailleurs, comme celui de la synchronisation manuelle de ces chronomètres avec une précision supposée du centième de seconde).

EXERCICES S'entraîner

23. Exercice résolu dans le manuel

24. Application de l'exercice résolu

1. $v_{max} = c$ d'après les postulats de la relativité restreinte.

D'où, $v_{max} = \dfrac{d}{\Delta t_{min}}$ car la durée de parcours sera minimale pour une célérité maximale.

On obtient :

$\Delta t_{min} = \dfrac{d}{v_{max}} = \dfrac{10{,}0 \times 10^3}{3{,}00 \times 10^8} = 3{,}33 \times 10^{-5}$ s.

2. $\tau' = \gamma \times \tau$ (dilatation des durées).

$\tau' > \Delta t_{min}$;

$\gamma \times \tau > \Delta t_{min}$;

$\gamma > \dfrac{\Delta t_{min}}{\tau}$.

3. $\gamma_{lim} = \dfrac{\Delta t_{min}}{\tau}$ soit $\dfrac{1}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{v^2}{c^2}\right)}} = \dfrac{\Delta t_{min}}{\tau}$ et par suite

$\sqrt{1 - \left(\dfrac{v}{c}\right)^2} = \dfrac{\tau}{\Delta t_{min}}$.

$1 - \left(\dfrac{v}{c}\right)^2 = \left(\dfrac{\tau}{\Delta t_{min}}\right)^2$ et $\left(\dfrac{v}{c}\right)^2 = 1 - \left(\dfrac{\tau}{\Delta t_{min}}\right)^2$;

$\dfrac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\dfrac{\tau}{\Delta t_{min}}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\dfrac{2{,}20 \times 10^{-6}}{3{,}33 \times 10^{-5}}\right)^2} = 0{,}998 \approx 1.$

On trouve bien le résultat attendu, la vitesse des muons doit être proche de la vitesse de la lumière pour qu'ils puissent atteindre le sol terrestre avant de se désintégrer.

25. Exercice résolu dans le manuel

26. Application de l'exercice résolu

1. $v = \dfrac{d}{\Delta t_m}$ soit

$\Delta t_m = \dfrac{d}{v} = \dfrac{2\pi r}{v} = \dfrac{2 \times \pi \times 23{,}9}{0{,}950 \times 3{,}00 \times 10^8} = 5{,}27 \times 10^{-7}$ s.

2. $\Delta t_m = \gamma \times \Delta t_p$;

$\Delta t_p = \dfrac{\Delta t_m}{\gamma} = \Delta t_m \times \sqrt{1 - \left(\dfrac{v}{c}\right)^2} = 5{,}27 \times 10^{-7} \times \sqrt{1 - 0{,}950^2}$

$= 1{,}64 \times 10^{-7}$ s

3. $N = \dfrac{\tau}{\Delta t_p} = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-6}}{1{,}64 \times 10^{-7}} = 1{,}89$; les particules vont donc parcourir plus d'un tour mais un peu moins de deux tours avant de se désintégrer.

27. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Analyser, valider, communiquer.**

a. D'après les postulats de la relativité restreinte, la célérité de la lumière dans le vide est invariante dans tous les référentiels galiléens.

Le vaisseau constitue un référentiel galiléen puisqu'il se déplace en mouvement de translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel lui-même galiléen. Donc, dans ce référentiel, la célérité de la lumière dans le vide est c.

b. Dans le référentiel du vaisseau, l'éclair doit parcourir à la vitesse c les mêmes distances pour atteindre D_1 ou D_2. Les durées de propagation sont donc égales dans ce référentiel.

c. D'après le postulat énoncé à la question a., l'éclair se propage aussi à la vitesse c dans le référentiel géocentrique.

d. On raisonne maintenant dans le référentiel géocentrique. Soit S_0 le point où se trouve la source à l'instant de l'émission de l'éclair (bien noter que ce point est un point fixe dans le référentiel d'étude). Pendant la propagation de l'éclair, D_2 s'éloigne de S_0 et D_1 s'en rapproche. L'éclair doit parcourir une distance plus petite pour atteindre D_1. Comme l'éclair se propage dans les deux sens avec la même vitesse c, la durée du trajet de S_0 à D_1 est plus courte que celle du trajet de S_0 à D_2.

e. Dans le référentiel du vaisseau, l'éclair atteint simultanément les deux récepteurs tandis que, dans le référentiel géocentrique, les deux réceptions ne sont pas simultanées. Or, il s'agit du même phénomène analysé dans deux référentiels différents.

La simultanéité dépend donc du référentiel d'étude alors que selon notre conception usuelle du temps, si deux évènements sont simultanés, ceci est vrai pour tout observateur.

On pourra insister sur le fait que le résultat est une conséquence de l'invariance de la vitesse de la lumière. On peut signaler que, dans une situation analogue où on étudierait par exemple un signal sonore, les vitesses de cette onde seraient différentes dans les deux référentiels. En raisonnant avec les lois classiques de composition des vitesses, on aboutirait à la conclusion que la simultanéité des évènements ne dépend pas du référentiel.

28. Reconnaître les effets relativistes

> COMPÉTENCES : **Analyser, valider.**

La dilatation des durées ne concerne qu'un phénomène analysé dans des référentiels différents. Aucune modification de l'écoulement du temps ne peut être ressentie dans un référentiel donné. L'argument du cosmonaute est faux.

29. Utiliser des approximations

> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider.**

a. La distance parcourue est $L = v\tau$. L'erreur relative commise est :

$\dfrac{c\tau - vt}{v\tau} = \dfrac{c - v}{v} = \dfrac{c}{v} - 1 = \dfrac{1}{0{,}99995} - 1 = 5 \times 10^{-5}$

soit 5×10^{-5} %.

b. Si on fait la même approximation, on aboutit à un résultat aberrant car on trouve un coefficient γ infini.

30. In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

a. L'hypothèse n'est pas scientifique dans le sens où aucun objet de masse non nulle ne peut atteindre la vitesse de la lumière (dans le vide).

b. L'internaute raisonne selon les lois classiques du mouvement. Il pense que la vitesse de la lumière par rapport au vaisseau est nulle comme c'est le cas pour la vitesse relative de deux véhicules qui se suivent à même vitesse.

c. « On ne peut pas envisager en respectant les lois de la physique que tu voyages exactement à la vitesse de la lumière (dans le vide). Mais tu peux imaginer que tu voyages *presque* à cette vitesse. D'après les postulats de la relativité, la vitesse de la lumière sera toujours égale à *c* par rapport à toi, quelque soit ta vitesse par rapport à la Terre. Tu pourras donc éclairer ton tableau de bord comme si ton vaisseau était immobile. »

Remarque : on pourrait objecter que, dans le vaisseau, la lumière ne se propagerait pas dans le vide mais se propagerait dans l'atmosphère de la cabine. Les lois de la physique n'interdisent pas que la vitesse du vaisseau soit supérieure à la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu gazeux. Ceci ne changerait pas le résultat : rien de ce qui se passe dans le référentiel du vaisseau n'est affecté par sa vitesse d'après le principe de relativité.

31. Comparer les indications d'horloges

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

a. Dans le référentiel lié à *S*, les horloges des deux fusées retardent, avec un décalage identique puisqu'elles ont la même vitesse.

b. Les lois classiques de composition des vitesses ne s'appliquent pas mais on peut tout de même affirmer que F_2 s'éloigne de F_1 plus vite que *S*.

Dans le référentiel lié à F_1, les horloges transportées par *S* et F_2 retardent mais le retard est plus grand pour F_2.

Remarque : dans un cas comme celui-ci, la contradiction entre les résultats de la physique classique et ceux de la physique relativiste est flagrante. Il faut bien insister sur le fait que les « observations » sont valables chacune uniquement dans un référentiel donné. D'autre part, les mots « observateur » ou « observation » laissent imaginer que l'on peut « voir » les horloges et leurs indications. Il faut bien comprendre que les observations dont il est question sont nécessairement (même dans des expériences de pensées) les résultats de mesures effectuées à partir d'informations transmises (à vitesses finies).

32. Comparer onde sonore et onde lumineuse

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

a. Les vitesses s'ajoutent ; par rapport à la voiture, le son se propage à la vitesse :

$$v + \frac{v}{4} \quad \text{soit} \quad \frac{5}{4}v.$$

b. La vitesse de la lumière par rapport à la fusée est *c*.

c. Les lois de composition des vitesses de la physique classique s'appliquent aux ondes sonores (**a.**) mais pas aux ondes lumineuses, d'après les postulats de la relativité restreinte (cf. §1.1). On retrouve dans la question **b.** que la vitesse de la lumière est invariante dans tout changement de référentiel galiléen.

33. ★ Coefficient de dilatation des durées

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, réaliser, analyser, valider.**

a. $\gamma_0 = 1$.

b. L'erreur relative est de 10 % lorsque $\gamma = 1{,}1$.

On lit $\frac{v}{c} = 0{,}4$ sur la courbe (le calcul avec l'expression de γ donne 0,417 et confirme cette lecture).

c. On doit avoir $\gamma = 2$.

On lit sur le graphique $\frac{v}{c} = 0{,}85 \approx 0{,}9$.

Par calcul : $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$;

$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{\gamma}$;

$1-\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\gamma^2}$;

$\frac{v^2}{c^2} = 1-\frac{1}{\gamma^2}$;

$\frac{v}{c} = \sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1-\frac{1}{4}} = 0{,}886.$

Ce résultat est cohérent avec la lecture graphique.

d. Il n'est pas possible d'obtenir une durée plus petite que la durée propre car $\gamma > 1$.

34. ★ S'auto-évaluer

Pour un observateur terrestre, la durée du voyage est :

$$\Delta t_m = \frac{D}{v}.$$

Pour les occupants du vaisseau, la durée du voyage est sa durée propre :

$\Delta t_p = \Delta t_m \times \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$

$\Delta t_p = \frac{D}{v} \times \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$

$\Delta t_p^2 = \frac{D^2}{v^2} \times \left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)$

$v^2 \times \Delta t_p^2 = D^2 \times \left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)$

$v^2\left(\Delta t_p^2 + \frac{D^2}{v^2}\right) = D^2$

$v = \frac{D}{\sqrt{\Delta t_p^2 + \left(\frac{D^2}{c^2}\right)}}.$

Avec $D = 4{,}2 \times 9{,}46 \times 10^{15}$ mètres ;
$\Delta t_p = 10 \times 365 \times 24 \times 3600$ secondes,
on obtient : $v = 1{,}3 \times 10^8$ m·s^{-1} soit $v = 0{,}4 \times c$.

35. ★★ Période apparente et période propre

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. $T = \dfrac{T_p}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$

b. $L_1 = c\tau_1$ et $L_2 = c\tau_2$.

c. $T_{app} = (\tau_2 + T) - \tau_1$: à la durée du parcours du deuxième signal, il faut ajouter son retard d'une période par rapport au premier. Ne pas oublier que toutes les durées intervenant ici doivent être celles mesurées dans le même référentiel R.

d. $L_2 - L_1 = c(\tau_2 - \tau_1) = c(T_{app} - T)$.

e. La variation $L_2 - L_1$ est la distance parcourue dans R par le pulsar pendant T :

$$L_2 - L_1 = vT.$$

f. D'après **d.** et **e.** : $c(T_{app} - T) = vT$ et en remplaçant T par l'expression donnée en **a.** :

$$c\left(T_{app} - \frac{T_p}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}\right) = v\frac{T_p}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} ;$$

$$cT_{app} = v\frac{T_p}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} + c\frac{T_p}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} ;$$

$$T_{app} = T_p \frac{\dfrac{v}{c}+1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}.$$

On réarrange en faisant apparaitre au numérateur :

$\sqrt{1+\dfrac{v}{c}}$ et en développant le dénominateur :

$$T_{app} = T_p \frac{\left(\sqrt{1+\dfrac{v}{c}}\right)\left(\sqrt{1+\dfrac{v}{c}}\right)}{\left(\sqrt{1+\dfrac{v}{c}}\right)\left(\sqrt{1-\dfrac{v}{c}}\right)} ;$$

$$T_{app} = T_p \frac{\sqrt{1+\dfrac{v^2}{c^2}}}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}.$$

g. Il s'agit de l'effet Doppler.

36. ★★ Énergie et vitesse

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Par lecture graphique, on trouve environ respectivement $1{,}5 \times 10^2$ MeV et $8{,}5 \times 10^2$ MeV ; soit une variation d'énergie presque 6 fois plus grande dans le deuxième cas pour une augmentation de vitesse 100 fois plus faible.

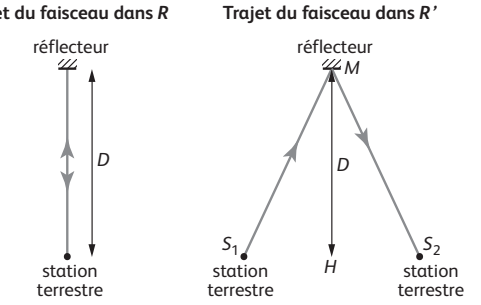
b. La différence de vitesse est extrêmement faible mais elle correspond à une grande différence d'énergie (elle est 7 fois plus grande).

c. À l'approche de la vitesse de la lumière, les vitesses des particules diffèrent peu les unes des autres mais les différences d'énergie sont importantes.

37. ★★ Distance Terre-Lune et relativité

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a.



b. $\Delta t = 2\dfrac{D}{c}$.

c. Le vaisseau, en mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel galiléen Terre-Lune, est lui-même un référentiel galiléen. D'après le principe de l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, la vitesse de l'impulsion dans R' est aussi c.

d. D'après le schéma de la question **a.**, le trajet de l'impulsion lumineuse est plus long dans le référentiel R'. Or sa vitesse de propagation est la même dans les deux cas donc la durée de propagation est plus grande dans R'.

e. Distance parcourue par la station terrestre dans le référentiel du vaisseau : $S_1S_2 = v \times \Delta t'$.

Longueur du trajet du faisceau dans R entre la Terre et la Lune : $D = c\dfrac{\Delta t}{2}$.

Longueur du trajet du faisceau dans R' entre la Terre et la Lune : $S_1M = S_2M = c\dfrac{\Delta t'}{2}$.

f. En appliquant le théorème de Pythagore dans le triangle S_1MH :

$S_1M^2 = D^2 + S_1H^2$.

D'où $\left(c\dfrac{\Delta t'}{2}\right)^2 = \left(c\dfrac{\Delta t}{2}\right)^2 + \left(v\dfrac{\Delta t'}{2}\right)^2$ d'où $\Delta t' = \dfrac{\Delta t}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$.

38. ★★ Voyager vers le futur

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider, communiquer.**

a. La phrase fait référence à la dilatation des durées pour un objet en mouvement.

b. La dilatation des durées concerne la mesure des durées dans deux référentiels. Dans le référentiel propre du voyageur, il n'y a pas de changement perçu concernant l'écoulement du temps.

c. On peut raisonner du point de vue du voyageur, en choisissant son référentiel comme étant immobile et le référentiel terrestre en mouvement.

d. La relativité restreinte ne concerne que les référentiels galiléens.
e. Le vaisseau doit accélérer au départ et ralentir à l'arrivée et il faut aussi qu'il fasse demi-tour donc à nouveau un mouvement non uniforme (et/ou non rectiligne). Le référentiel du vaisseau n'a donc pas un mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel terrestre supposé galiléen.
Le jumeau sédentaire est dans un référentiel galiléen et le voyageur dans un référentiel non galiléen. Le jumeau voyageur ressent les accélérations par rapport au référentiel terrestre alors que le jumeau sédentaire ne ressent pas les accélérations par rapport au vaisseau. Les situations ne sont pas symétriques.
f. La réciprocité des situations ne s'appliquant pas, il n'y a pas de contradiction dans le fait de trouver que les deux jumeaux ne se retrouvent pas au même stade de vieillissement.
Remarque : c'est l'application incorrecte de la réciprocité à la situation qui conduit à ce que l'on appelle « le paradoxe des jumeaux » de Langevin.

39. Détection des particules

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider, communiquer.**
Les parties du texte surlignées indiquent les notions qui doivent apparaître dans la rédaction du compte rendu.
Le compte rendu devra montrer que l'on sait qu'aucune particule ne peut dépasser la vitesse de la lumière (dans le vide) selon le postulat sur lequel s'appuie la théorie de la relativité restreinte. C'est cette impossibilité qui semble avoir été remise en cause selon la mesure effectuée dans cette expérience.
En faveur d'une erreur de mesure, il faudra faire apparaître la très faible différence mesurée entre la vitesse des neutrinos et la limite théorique (0,002 %). On devra relever :
– la haute sensibilité de la mesure aux retards introduits par l'électronique de la chaîne de mesure ;
– l'influence de plusieurs facteurs sur la distance à mesurer dont les effets de marées ou la dérive des continents (citer obligatoirement un exemple au moins) ;
– l'influence de plusieurs facteurs sur la mesure du temps : rotation de la Terre, gravitation terrestre (citer obligatoirement un exemple) ;
– il est important d'évoquer l'observation de neutrinos cosmiques qui aurait dû faire apparaître un écart de plusieurs années entre l'arrivée des neutrinos et celle du flash lumineux associé pour être compatible avec l'écart mesuré dans l'expérience du Cern. On fera apparaître aussi, dans le compte rendu, que cette critique a ses limites car on ne compare pas des neutrinos ayant des énergies de même ordre de grandeur ;
– la théorie de la relativité restreinte est vérifiée avec une précision considérable ce qui rend suspecte une expérience qui la remettrait en cause.
En défaveur d'une erreur de mesure :
– l'écart mesuré est compatible avec la précision des instruments disponibles et toutes les sources d'erreurs ont semble-t-il été envisagées ;
– on ne connaît pas complètement la physique du neutrino et l'écart pourrait venir d'un comportement ignoré de cette particule et non pas d'une violation du postulat de l'impossibilité de dépassement de la vitesse de la lumière.
La présentation de pistes sur les conséquences d'une confirmation du résultat peut rester à un niveau modeste faute de développements d'ordre philosophique.
On attend essentiellement que l'élève comprenne que cette confirmation remettrait en cause la théorie de la relativité et ouvrirait la voie pour de nouvelles recherches théoriques. Le professeur pourra insister à cette occasion sur le fait que la science évolue par remises en cause permanentes de certitudes acquises sans pour autant que les théories précédentes soient abandonnées.
Quant aux conséquences pratiques, on appréciera que l'élève interprète correctement la conclusion du document en expliquant que les recherches les plus éloignées des préoccupations du quotidien finissent par déboucher, à plus ou moins long terme sur des applications pratiques, sans qu'on puisse prévoir lesquelles.

EXERCICES Objectif BAC

40. CHIMIE ORGANIQUE RELATIVISTE

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, valider, communiquer.**
1. Le temps propre, la durée propre concernant un objet, est la durée mesurée par une horloge immobile dans le référentiel propre de cet objet (référentiel dans lequel cet objet est immobile).
Les deux référentiels étudiés dans cet exercice sont :
• le référentiel propre, référentiel de la navette spatiale ;
• le référentiel lié aux deux balises et donc à la Terre.
2. a. Δt_p est la durée propre, Δt_m est la durée mesurée.
b. Δt_p est mesurée dans le référentiel propre, le référentiel de la navette ; Δt_m est mesurée dans le référentiel lié aux balises et à la Terre.
c. La réaction chimique se déroulant dans la navette, une seule et même horloge au repos dans la navette suffira à la mesure de Δt_p.
d. $\dfrac{1}{\gamma^2} = 1 - \dfrac{v^2}{c^2}$;

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}.$$

A.N. : $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1 - 0{,}80^2}} = 1{,}7$.
La durée inconnue est Δt_m et $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p$.
A.N. : $\Delta t_m = 1{,}7 \times 1\,000 = 1{,}7 \times 10^3$ s.
e. $\Delta t_m > \Delta t_p$, la durée propre est la durée la plus courte possible pour un événement (dilatation des durées).
Plus la vitesse de l'objet se rapproche de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide, plus les effets relativistes sont importants, notamment la dilatation des durées.

3. La durée de vie des muons est telle qu'ils ne devraient pas pouvoir atteindre le sol terrestre avant de se désintégrer. La dilatation des durées permet toutefois d'expliquer pourquoi on peut détecter des muons cosmiques sur le sol terrestre.

41. LE MUON, EXPLORATEUR DE VOLCANS

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, valider.**

1. a. « Un muon créé à une hauteur de 20 km doit mettre environ 67 µs pour arriver au sol. » (doc. 1) Il s'agit ici d'une estimation, on utilisera la valeur approchée de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide, $c = 3{,}0 \times 10^8$ m.s^{-1} et on admet, d'après le document 1, que $v = 0{,}9994c$ est la valeur de la vitesse des muons.

$v = \dfrac{d}{\Delta t}$ soit $\Delta t = \dfrac{d}{t} = \dfrac{d}{0{,}9994c}$.

A. N. : $\Delta t = \dfrac{20 \times 10^3}{0{,}9994 \times 3{,}0 \times 10^8} = 6{,}7 \times 10^{-5}$ s ≈ 0,67 µs.

b. La vitesse de propagation de la lumière dans le vide est indépendante du mouvement de la source lumineuse et invariante dans tout changement de référentiel.

c. La durée de vie des muons est si faible qu'ils ne devraient pas pouvoir atteindre le sol avant de se désintégrer. Dans un référentiel terrestre galiléen, la durée de vie mesurée des muons sera bien plus grande que la durée de vie propre de ces particules, c'est la dilatation des durées. Le phénomène est d'autant plus marqué ici que la valeur de la vitesse des muons est proche de la célérité de la lumière. Beaucoup de muons pourront ainsi atteindre le sol avant de s'être désintégré.

d. Le muon, le proton et l'électron possèdent ici la même vitesse et la même valeur absolue de charge électrique. D'après les données, les trois particules seront soumises à une force magnétique de même intensité.

Les effets d'une même force sur une particule dépendent de la masse de la particule (on le constate notamment dans la seconde loi de Newton, pour une même force subie, le vecteur accélération de la particule différera en fonction de sa masse). Le muon, le proton et l'électron subissant la même force magnétique, le document 1 mentionne un rayon de courbure intermédiaire pour la trajectoire du muon. On en déduit que sa masse est également comprise entre celle de l'électron et celle du proton.

2. a. $\Delta t_m = \gamma \times \Delta t_p = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} \times \Delta t_p$.

A. N. : $\Delta t_m = \dfrac{1}{\sqrt{1 - 0{,}9994^2}} \times \Delta t_p = 28{,}87 \times \Delta t_p$.

On trouve bien le résultat attendu : la durée de vie de ces muons est d'environ 30 fois leur durée de vie au repos.

b. Les 14/15 tours indiqués dans le texte correspondent en réalité aux nombres de tours mesurés dans le référentiel propre. Ce nombre de tour étant proportionnel à la durée de vie, on aura γ fois plus de tours dans le référentiel de mesure, le référentiel terrestre galiléen, soit :

$28{,}87 \times 14 = 404$ tours

$28{,}87 \times 15 = 433$ tours

On trouve bien des valeurs du même ordre que les 400 tours indiqués dans le texte.

3. a. D'après le document 2, un muon perd en moyenne 2 MeV par cm de roche traversée et l'énergie initiale des muons est en moyenne de 4 GeV.

L'épaisseur de roche moyenne traversée par ces muons sera :

$h = \dfrac{\text{Énergie}_{\text{totale}}}{\text{Énergie}_{\text{perdue par cm}}} = \dfrac{4 \times 10^3}{2} = 2 \times 10^3$ cm = 20 m.

D'après le document 3, compte-tenu de l'échelle indiquée, il est évident que les dimensions caractéristiques du cratère sont supérieures à 500 m. Les muons d'énergie moyenne 4 GeV ne permettent pas de « radiographier » ce volcan.

b. D'après le document 2, on dénombre environ 1 muon par cm^2 et par minute.

Pour évaluer l'ordre de grandeur de l'énergie apportée pendant une minute par le flux de muons sur la surface du volcan, il est nécessaire de connaître la valeur de cette surface en utilisant le document 3 : 3,0 cm sur le document représentent 500 m soit 1,0 cm sur le document représente $\dfrac{500}{3}$ m. La surface de la Soufrière exposée aux muons est celle du disque de diamètre D (d'après le document 3) et on mesure sur la figure 6 cm pour ce diamètre (mesure très approchée), soit :

$$D = 6 \times \frac{500}{3} = 1\,000 \text{ m} = 1 \times 10^5 \text{ cm}.$$

On exprime D en cm pour obtenir directement la surface en cm^2 conformément à l'unité utilisée par le document 2 pour exprimer le flux.

La surface S du disque est :

$$S = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \times \left(\frac{1 \times 10^5}{2}\right)^2 = 7{,}85 \times 10^9 \text{ cm}^2.$$

On obtient un flux de $7{,}85 \times 10^9$ muons par minute sur toute la surface du volcan.

Si on suppose toujours que ce sont des muons ordinaires, chacun d'entre eux possède une énergie de 4 GeV, soit une énergie de $7{,}85 \times 10^9 \times 4 = 3{,}14 \times 10^9$ GeV et un ordre de grandeur de 10^{10} GeV par minute pour toute la surface du volcan.

Pour comparer cette énergie avec une énergie usuelle, évaluons cette énergie en Joules :

10^{10} GeV $= 10^{10} \times 10^9 \times 1{,}6 \times 10^{-19}$ J = 1,6 J soit un ordre de grandeur d'un joule.

Par comparaison, un objet de masse $m = 100$ g chutant d'une hauteur $h = 1$ m aurait une énergie potentielle de pesanteur initiale d'un joule :

$\mathscr{E}_{pp} = m \times g \times h = 0{,}100 \times 10 \times 1 = 1$ J.

Remarque : les mesures sur le document 3 et les différentes approximations réalisées conduisent ici nécessairement à une détermination d'un ordre de

grandeur. Il ne faut surtout pas donner les résultats finaux avec plus d'un chiffre significatif.

c. D'après les données, $\mathscr{E} = \gamma \times m \times c^2$ et donc $\gamma = \dfrac{\mathscr{E}}{mc^2}$.

A. N. : $\gamma = \dfrac{4 \times 10^3}{105{,}66} = 3{,}7857 \times 10^1$.

Remarque : E en MeV et m en MeV·c^{-2}

$\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$ et donc :

$\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}} = \dfrac{1}{\gamma}$

$1 - \dfrac{v^2}{c^2} = \dfrac{1}{\gamma^2}$

$1 - \dfrac{1}{\gamma^2} = \dfrac{v^2}{c^2}$

$\dfrac{v}{c} = \sqrt{1 - \dfrac{1}{\gamma^2}}$.

A. N. :

$\dfrac{v}{c} = \sqrt{1 - \dfrac{1}{(3{,}7857 \times 10^3)^2}} = 0{,}9965 \times 10^{-1} = 9{,}9965$

La valeur de cette vitesse est très proche de la célérité de la lumière dans le vide (plus de 99,9 %), ces muons sont bien ultra-relativistes.

CHAPITRE 12

COMPRENDRE

Temps et évolution chimique : cinétique et catalyse

> Manuel pages 264 à 289

Choix pédagogiques

Cet unique chapitre portant sur la cinétique a été construit de manière à mettre l'accent sur le suivi temporel d'une transformation chimique, la définition et la mesure de sa durée, ainsi que les moyens disponibles pour la modifier (facteurs cinétiques et catalyseur). La notion de vitesse de réaction, qui ne figure plus au programme, n'est pas introduite.

La définition de la durée de la transformation proposée dans ce chapitre est celle de l'IUPAC. Son côté arbitraire est mis en évidence. Le choix d'un critère est souvent lié aux moyens mis en œuvre pour suivre la transformation. Plusieurs exemples de méthodes de suivi sont évoqués dans les activités dont deux démarches d'investigation, le cours et les exercices jusqu'aux exercices « Objectif bac » (spectrophotométrie, CCM, mesure de pression, observation de l'opacification d'une solution, etc.). La notion de temps de demi-réaction est également introduite, comme une définition particulière de durée de transformation.

La possibilité de modifier la durée de la transformation en jouant sur la température, les concentrations en réactif ainsi que le solvant est expérimentée, en remarquant que la modification des concentrations initiales en réactif limitant peut avoir des effets différents d'une transformation à l'autre. Enfin, les différents types de catalyse sont introduits et comparés en insistant sur leur importance dans le milieu industriel et dans la chimie du vivant.

Notons que le programme officiel utilise l'expression « durée de réaction » alors qu'on utiliserait plus volontiers le terme « durée de transformation ». Ces deux expressions sont utilisées dans le cours pour se conformer aux différents usages.

Des animations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Préparation d'un caramel

Comment un chimiste peut-il interpréter les conditions opératoires des transformations ayant lieu au cours de la préparation du caramel ?

La photographie de la page d'ouverture relie chimie et vie quotidienne – plus particulièrement la cuisine. La recette du caramel a été certainement trouvée de manière empirique et nécessite quelques conseils. Cependant, la cinétique chimique aurait été bien utile pour proposer un protocole-recette sans multiplier les expérimentations. En effet, la température est un facteur cinétique de la transformation du saccharose puis du glucose et du fructose tandis que les acides la catalysent. Ainsi, grâce à ce questionnement, les élèves mettront en évidence trois notions-clefs de ce chapitre :

– décider à quel instant une transformation est finie ;

– la durée d'une transformation chimique peut être augmentée ou diminuée en jouant sur la température ;

– certaines espèces chimiques permettent de faire diminuer cette durée.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Estimer la durée d'une réaction

Commentaires

Cette activité permet d'introduire la notion de définition arbitraire d'une durée de réaction grâce à un suivi par CCM de l'évolution d'une transformation chimique : l'oxydation de l'alcool benzylique en benzaldéhyde.

La réaction est suffisamment lente pour que son évolution soit bien visible. Par ailleurs, elle est assez rapide pour être mise en œuvre lors d'une séance de TP puisqu'une trentaine de minutes suffit à voir la disparition totale de la tache correspondant à l'alcool benzylique.

Trois documents aident à mettre en œuvre et à comprendre cette activité. Le premier décrit le protocole. Quant au second, il donne le résultat de l'expérience afin que des élèves n'ayant pas réussi leur CCM puissent répondre aux questions. Enfin, le troisième définit le rôle de l'ion tétrabutylammonium. Plusieurs données sont également fournies.

On peut faire remarquer aux élèves la transformation d'une fonction alcool en fonction aldéhyde. L'oxydant est l'ion hypochlorite dissous en phase aqueuse alors que l'alcool benzylique est dissous dans de l'acétate

d'éthyle. L'ajout d'un catalyseur de transfert de phase (le bromure de tétrabutylammonium) ainsi qu'une agitation vigoureuse sont nécessaires. L'observation de la plaque sous lampe UV montre la disparition progressive de l'alcool benzylique (tache inférieure) et la formation du benzaldéhyde de plus grand rapport frontal. La durée de réaction peut être choisie comme celle au bout de laquelle la tache de l'alcool benzylique n'est plus visible.

Réponses

RÉALISER

1. Le protocole est facile à suivre d'autant qu'il s'agit en grande partie d'un réinvestissement de la technique de CCM. Il faut bien veiller à ce que les prélèvements ne soient effectués que dans la phase organique. Les élèves doivent entourer les taches visibles sous UV seulement.

ANALYSER

2. a. L'alcool benzylique est le réactif limitant. Pour que la durée de la transformation ne dépasse pas 30 minutes, il faut en prélever un volume assez faible. L'emploi d'une pipette graduée de 5 mL ou jaugée de 2 mL est ici recommandé.

L'eau de Javel est également un réactif mais en excès ; il n'est pas nécessaire de connaître sa quantité de matière de façon précise. On utilise donc une éprouvette graduée.

L'éthanoate d'éthyle est le solvant. Sa quantité de matière ne doit pas être précisément connue. On utilise donc une éprouvette graduée.

b. La tache inférieure (la seule présente à $t = 0$) correspond au réactif visible sous UV : l'alcool benzylique. La seconde (la seule présente à 30 min) est celle du produit : le benzaldéhyde.

c. L'allure de la CCM aux temps 0, 10, 20 et 30 min n'est pas la même : une réaction se produit entre ces instants ; la transformation est donc assez lente pour être analysée par CCM.

VALIDER

3. a. Il n'y a plus de tache inférieure à 30 minutes. On peut donc estimer la durée de la transformation entre les dates $t = 20$ min et $t = 30$ min.

b. On pourrait suivre le même protocole au moment du mélange initial et préparer trois plaques de CCM. Puis, attendre 20 minutes et ensuite effectuer un dépôt par minute jusqu'à 30 minutes. Enfin, révéler les trois plaques.

2. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Mise en évidence de facteurs cinétiques

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

3. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Évolution temporelle d'une quantité de matière

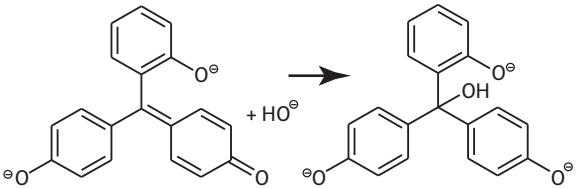
Commentaires

Dans cette activité, il s'agit de suivre l'évolution temporelle d'une réaction par spectrophotométrie. L'activité permet l'introduction de la définition du temps de demi-réaction $t_{1/2}$ et permet d'étudier l'influence de la concentration initiale en ion hydroxyde sur la valeur de $t_{1/2}$.

La notion d'absorbance ainsi que la loi de Beer-Lambert sont les prérequis nécessaires de 1re S. Les mesures de l'absorbance au cours du temps seront exploitées dans un tableur-grapheur de manière à tracer la courbe représentant la quantité de P en fonction du temps.

Deux documents sont fournis. Le premier décrit le protocole à suivre et précise que les contraintes de sécurité quant à l'usage de la phénolphtaléine sont remplies. Le second présente le matériel expérimental ; l'équation de la réaction est donnée.

La réaction étudiée est la suivante :

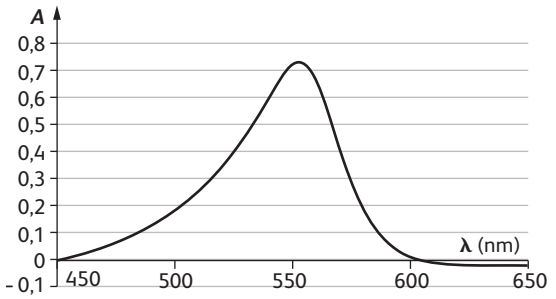


P, de couleur rose en solution — $A^{\ominus}$, incolore en solution

Elle est simplement notée $P + HO^- \rightarrow A^-$ dans le document 2.

Remarques :

– voici le spectre d'absorption de la phénolphtaléine en milieu légèrement basique :



– la limite de toxicité de la phénolphtaléine est de 1 g/L. Dans chaque cuvette, la concentration massique de la phénolphtaléine n'excède pas 0,2 g/L. Cette expérience est donc tout à fait réalisable au lycée.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Il s'agit de la concentration initiale en hydroxyde de sodium qui varie entre les deux groupes.

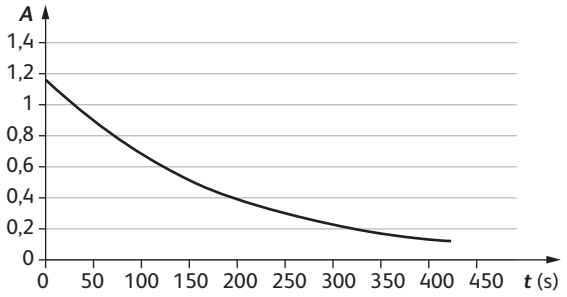
RÉALISER

2. a. Le protocole ne présente aucune difficulté particulière. Chaque binôme doit s'organiser ; idéalement un des élèves s'occupe de la partie manipulation (préparer les

cuves puis lire les valeurs d'absorbance) tandis que l'autre entre les données dans un logiciel. L'interprétation des résultats doit être concertée afin que le travail collaboratif fonctionne pleinement.

b. Le résultat d'une expérience est donné ici pour une concentration en ions hydroxyde de 0,30 mol·L^{-1}.

Remarque : le volume d'une goutte n'étant pas le même d'un élève à l'autre, l'absorbance initiale ne sera pas la même pour tous les élèves. La réaction étant d'ordre 1 (en dégénérescence de l'ordre) cela n'a pas d'influence sur le temps de demi-réaction.



ANALYSER

3. La couleur rose de la solution non introduite dans le spectrophotomètre s'atténue au cours du temps. Au bout de 10 minutes environ, la solution est incolore.

La courbe tracée montre que l'absorbance décroît au cours du temps.

Ces deux observations concordent.

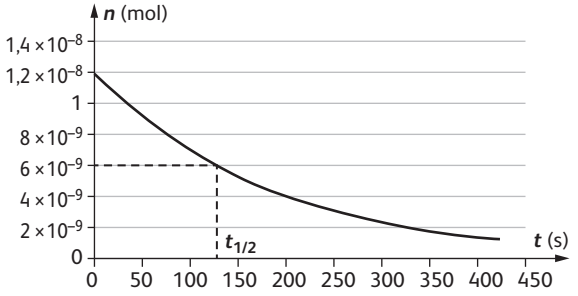
RÉALISER

4. a. D'après la loi de Beer Lambert :

$A_{553} = \varepsilon_{553} \ell [P]$.

Or, $[P] = \dfrac{n}{v}$ donc $n = [P] \times V = \dfrac{A_{553}}{\varepsilon_{553} \ell} \times V$.

Numériquement, la relation précédente devient $n = (1{,}03 A_{553})$ mol. Le tracé de la quantité de matière en fonction du temps est donné ci-dessous.



b. La date $t_{1/2}$ correspond au moment où la moitié de la phénolphtaléine initialement présente a été consommée, c'est-à-dire $6{,}0 \times 10^{-9}$ mol. Sur le graphique, on lit $t_{1/2} = 130$ s.

c. Le groupe ayant travaillé avec la concentration en ion hydroxyde de 0,50 mol.L^{-1} devrait trouver un temps de demi-réaction moyen égal à 80 secondes.

Si une valeur s'écarte de plus de 5 % de ces deux valeurs moyennes (80 et 130 s), il faut alors l'écarter du fait d'une erreur systématique ou/et d'une erreur aléatoire faite par le binôme concerné.

VALIDER

5. a. Les temps de demi-réaction moyens ne sont pas identiques. Le paramètre ayant changé entre les groupes est la concentration en ion hydroxyde. Par conséquent la concentration initiale en ion hydroxyde a une influence sur le temps de demi-réaction et constitue donc bien un facteur cinétique.

b. La température pourrait influencer la cinétique de cette transformation chimique.

Prolongement : pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, on pourrait placer le milieu réactionnel dans un bain-marie à différentes températures et mesurer l'absorbance pendant 5 minutes. Si le temps de demi-réaction a des valeurs moyennes différentes, on conclut que la température est un facteur cinétique pour cette transformation.

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
L'utilisation des catalyseurs dans l'industrie

Commentaires

Cette activité documentaire a pour but d'analyser des informations concernant la catalyse.

Quatre documents ont été sélectionnés dont trois issus du site du CNRS – ce qui permettra aux élèves curieux de parcourir ce site. Ils proposent une définition du terme catalyseur et exposent l'intérêt de son utilisation dans l'industrie en vue de réduire les coûts énergétiques. Les particularités de la catalyse enzymatique sont indiquées et leur spécificité mise en évidence sur un exemple.

La dernière question permet de résumer les réponses précédentes en un paragraphe structuré.

Notons que le document 1 mentionne la notion de « vitesse de réaction ». Il sera nécessaire d'expliquer qu'augmenter la vitesse signifie réduire la durée de la réaction.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Un catalyseur a pour rôle d'accélérer une transformation chimique, c'est-à-dire d'en diminuer la durée.

ANALYSER

2. a. *Avantages relevés dans les documents*

Document 1 :

– La présence de catalyseur diminue la durée d'une réaction, d'où un gain de temps.

– Une petite quantité de catalyseur est suffisante pour transformer une grande quantité de produit, d'où un faible coût.

– Un catalyseur est généralement spécifique à une transformation et réciproquement. On peut donc choisir le catalyseur en fonction du produit souhaité à partir

d'un même réactif. On peut aussi influencer la nature du produit selon le choix du catalyseur. Ceci offre une liberté et un large panel aux chimistes.
Document 2 :
– Utiliser un catalyseur permet d'éviter un chauffage important et de réduire ainsi le coût énergétique de la transformation.
Document 3 :
– L'utilisation d'enzymes permet aux industriels d'importantes économies en termes de coût de production puisque les conditions opératoires sont alors douces. En outre, une enzyme est encore plus sélective que les autres catalyseurs, ce qui évite d'avoir à éliminer des produits issus de réactions parasites.
Inconvénients relevés dans les documents
Document 3 :
– Une enzyme se dégrade si les conditions opératoires (température et pH) ne sont pas strictement encadrées.
– Il est encore difficile de recycler efficacement les enzymes afin de les utiliser un grand nombre de fois.
b. D'après le document 3, les enzymes sont efficaces dans des conditions douces (pH neutre, température peu élevées) qui sont celles que l'on retrouve dans les organismes vivants.

COMMUNIQUER
3. Le paragraphe doit utiliser les réponses précédentes. Une rédaction claire et structurée est demandée. Rien n'empêche les élèves d'avoir recours à une recherche documentaire plus approfondie et d'appuyer leurs propos sur des exemples concrets non indiqués dans cette activité.

5. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Les types de catalyse

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

EXERCICES Appliquer le cours

Évolution d'un système chimique dans le temps (§1 du cours)

11. Estimer une durée par CCM
Les deux premiers dépôts correspondent aux deux réactifs. La représentation de la plaque montre que seul le *para*aminophénol est visible après révélation. L'intensité de la tache correspondante diminue au cours du temps. Une seconde tache apparaît au cours de la réaction, son intensité augmente. On en déduit qu'il s'agit du produit, le paracétamol. On peut définir la durée de la transformation comme étant la durée nécessaire pour que, dans les mêmes conditions de dépôt, cette tache ne soit plus visible, ce qui correspond au dépôt 5 et donc à une durée de 15 minutes.

12. Déterminer un temps de demi-réaction
a. Le choix de l'expérimentateur s'avère pertinent.
En effet, notons *R*Cl le 2-chloro-2-méthylpropane et *R*OH le 2-méthylpropan-1-ol.
Le tableau d'évolution de la réaction est :

		RCl	+ H_2O	$\rightarrow ROH$	+ H^+	+ Cl^-
État	**Avancement**	**Quantités de matière**				
initial	0	$n_0 = 2$ mol	excès	0	0	0
En cours	x	$n_0 - x$	excès	x	x	x

La durée de la transformation t_d choisie par l'expérimentateur correspond à la date où l'avancement vaut $0{,}9x_{max}$ donc $0{,}9n_0$. À cette date, la quantité de *R*Cl restante est $n_0 - 0{,}9n_0 = 0{,}1n_0 = 0{,}2$ mol.
Pour mesurer t_d on lit sur le graphique, pour chaque courbe, l'abscisse des points d'ordonnée 0,2 mol. On obtient :

Courbe	Propanone	Eau	t_d
rouge	50 %	50 %	4,5 min
bleue	25 %	75 %	3,4 min
verte	0 %	100 %	2,4 min

On remarque que les valeurs relevées sont franchement différentes. C'est pourquoi l'expérimentateur a eu raison de faire ce choix.

b. En $t_{1/2}$, $x = \frac{x_f}{2}$. Or $x_f = 2$ mol donc en $t_{1/2}$, $x = 1$ mol.
Par lecture graphique, on détermine les valeurs du temps de demi-réaction pour chaque condition :

Courbe	rouge	bleue	verte
$t_{1/2}$ (min)	1,4	1,1	0,7

Influence des facteurs cinétiques (§2 du cours)

13. Mettre en évidence l'influence du solvant
t_d dépend de la nature du solvant qui constitue donc un facteur cinétique.

14. Proposer des expériences
Il faut faire varier la quantité initiale d'eau. Si le solvant est un mélange eau-propanone, le fait de faire varier la quantité initiale d'eau ferait changer la composition du solvant. C'est pourquoi le solvant ne doit être que de l'eau. Il faut donc varier les volumes de solvant (l'eau) puis mesurer les quantités *n* de 2-chloro-2-méthylpropane au cours du temps. Les courbes obtenues *n* en fonction du temps se superposent, ce qui montre que la quantité d'eau n'est pas un facteur cinétique.

15. Établir un protocole expérimental
a. Pour étudier l'influence de la concentration initiale c_1 en ion éthanolate, on doit la modifier sans modifier la concentration initiale c_2 en iodométhane. On peut par exemple modifier le volume V_1 de l'échantillon de solution (S_1) d'ion éthanolate, mais conserver le volume V_2 de l'échantillon de l'autre solution (S_2) ainsi que le volume total V_{tot} en adaptant le volume V_e d'éthanol versé.

On peut choisir, par exemple, de réaliser les expériences 2 ou 3 (ou les deux) décrites dans le tableau en bas de page. L'expérience 1 correspond à l'expérience décrite dans l'énoncé.

b. Il faut placer le mélange réactionnel dans des bains thermostatés de températures différentes, tout autre paramètre restant inchangé. Ensuite, il faut suivre l'évolution de l'avancement x comme précédemment, puis déterminer et enfin comparer les temps de demi-réaction par exemple.

Utilisation des catalyseurs (§3 du cours)

16. Déterminer un type de catalyse

Homogène.
Hétérogène.
Hétérogène.
Enzymatique.

17. Analyser une vidéo d'expérience

Lors de cette expérience, on voit la couleur de la solution évoluer sur plusieurs minutes. Le suivi cinétique est donc réalisable par un spectrophotomètre : la réaction est lente. D'autre part, on constante une évolution des couleurs qui semble périodique dans le temps. Cette transformation est souvent qualifiée de transformation oscillante.

EXERCICES S'entraîner

18. Exercice résolu dans le manuel

19. Application de l'exercice résolu

1. Le temps de demi-réaction désigne la durée de la transformation pour laquelle l'avancement est égal à la moitié de l'avancement final.

Dans le cas de la réaction entre cristal violet et ions hydroxyde, l'avancement final est égal à l'avancement maximal, c'est-à-dire correspond à une absorbance nulle. Initialement, l'absorbance est égale à 1,0. La moitié de l'avancement final correspond à une absorbance égale à 0,50.

On lit sur le graphique :

$t_{1/2,1} = 1{,}1$ min ; $t_{1/2,2} = 0{,}7$ min ; $t_{1/2,3} = 0{,}6$ min.

2. Les conditions opératoires des expériences 1 et 3 ne varient que par leur température. Comme les temps de demi-réactions $t_{1/2,1}$ et $t_{1/2,3}$ ont des valeurs différentes, on déduit que la température est bien un facteur cinétique pour cette transformation chimique.

3. On note également que $t_{1/2,3} < t_{1/2,1}$. Une augmentation de température de 20 à 30 °C a pour effet de diminuer la durée de cette transformation.

20. Exercice résolu dans le manuel

21. Application de l'exercice résolu

1. Pour un pH compris entre 0 et 4, l'uréase n'a aucune activité.

Son activité augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale pour un pH de 6.

Pour des pH compris entre 6 et 10, l'activité de cette enzyme diminue.

2. L'estomac est un milieu très acide caractérisé par un pH inférieur à 4. Si l'uréase n'était pas associée à d'autres entités chimiques, son activité serait nulle dans l'estomac ; l'urée ne serait donc pas décomposée au sein de la bactérie. Comme le phénomène observé est à l'opposé de cette conclusion, on en déduit que l'uréase n'est pas seule à agir dans l'estomac.

22. ★ Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a. La dissolution du dioxygène dans l'eau, obtenue par agitation, colore la solution en bleu. L'apparition de la couleur bleue est immédiate. La dissolution est donc très rapide.

b. Tant que la solution est bleue, il reste du dioxygène en solution. La disparition de la couleur est lente (on l'observe à l'œil), donc cette réaction est lente. Il faut 20 secondes pour observer la disparition de la couleur, durée que l'on peut définir comme étant la durée de la transformation.

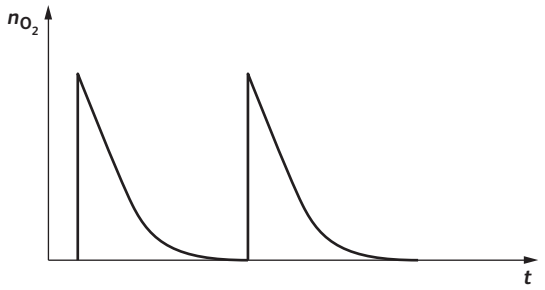
c. Noter qu'au début de la vidéo, la solution est incolore, la quantité de dioxygène aqueux est donc nulle. Après une agitation, la solution est bleue, donc la quantité de dioxygène aqueux prend une valeur non nulle. On observe ensuite la disparition de la couleur bleue, donc celle du dioxygène, ce qui traduit sa consommation selon la réaction d'équation :

$$2R\text{–CHO (aq)} + 2HO^- \text{ (aq)} + O_2 \text{ (aq)} \rightarrow 2R\text{–}CO_2^- \text{ (aq)} + 2H_2O\ (\ell)$$

Par conséquent, la concentration en dioxygène aqueux est décroissante et tend vers zéro. Le phénomène est répétitif : à chaque agitation, du dioxygène se dissous rapidement, il est ensuite lentement consommé.

Tableau de la question a. de l'exercice 15. :

Expérience	V_1	V_2	V_e	V_{tot}	$c_1 = c\dfrac{V_1}{V_{tot}}$	$c_1 = c\dfrac{V_2}{V_{tot}}$
1	10 mL	10 mL	20 mL	40 mL	0,50 mol·L^{-1}	0,50 mol·L^{-1}
2	5,0 mL	10 mL	25 mL	40 mL	0,25 mol·L^{-1}	0,50 mol·L^{-1}
3	20 mL	10 mL	10 mL	40 mL	1,0 mol·L^{-1}	0,50 mol·L^{-1}



d. L'équation de la réaction montre qu'une mole de dioxygène est consommée lorsque 2 moles de glucose le sont. On dispose de 1 mol de glucose. Pour le consommer entièrement, il faut 0,5 mol de dioxygène. Or, initialement, la quantité de O_2 est $n_0 = 2$ mmol $< 0{,}5$ mol. Le dioxygène est donc le réactif limitant. À chaque agitation, on introduit une quantité n_a de dioxygène. On peut réaliser cette opération jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de dioxygène disponible, soit :

$$\frac{n_0}{n_a} = \frac{2}{0{,}15} = 13{,}3$$

On peut donc le faire 14 fois (la dernière agitation dissoudra une quantité de dioxygène inférieure à 0,15 mmol).

23. Plus sucré

> COMPÉTENCES : **Réaliser, analyser, valider.**

a. Le temps de demi-réaction est la date à laquelle l'avancement est égal à la moitié de l'avancement final, ce qui correspond ici à la date où la concentration en *S* est égale à la moitié de sa concentration initiale. Par lecture graphique, on détermine les valeurs de $t_{1/2}$.

Concentration initiale en enzyme	$2c$	c	$0{,}5c$
$t_{1/2}$ **(s)**	0,15	0,3	0,6

b. Plus la concentration initiale en enzyme est importante, plus le temps de demi-réaction est faible.

c. Le rôle catalytique de l'enzyme est interprété par la formation d'une espèce intermédiaire appelée complexe enzyme-substrat qui s'établit par formation de liaisons faibles entre le substrat (ici le saccharose) et l'enzyme. La réaction est d'autant plus rapide que de nombreuses molécules d'enzyme sont présentes pour accueillir les molécules de substrat.

24. Suivi spectrophotométrique d'une transformation

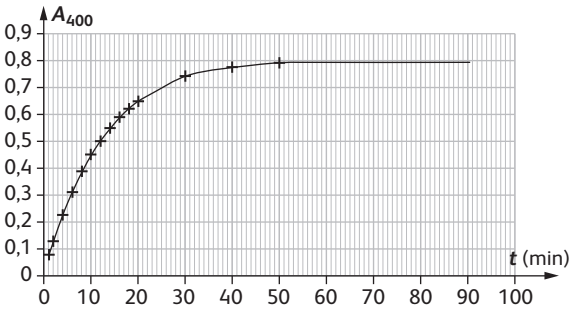
> COMPÉTENCES : **Réaliser, analyser, valider.**

a. Le tableau d'évolution de la réaction est :

		$2I^-(aq) + S_2O_8^{2-}(aq) \rightarrow I_2(aq) + 2SO_4^{2-}(aq)$			
État	**Avancement**	**Quantités de matière**			
initial	0	excès	n_0	0	0
en cours	x	excès	$n_0 - x$	x	$2x$

L'avancement de la réaction est égal à la quantité x de diiode formée. La seule espèce colorée est le diiode. D'après la loi de Beer-Lambert, l'absorbance mesurée est donc proportionnelle à la concentration $\frac{x}{V}$ en diiode et donc également à l'avancement x de la réaction puisque le volume *V* est constant. L'avancement maximal de la réaction est n_0. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement sera égal à $\frac{n_0}{2}$, ce qui correspondra à une valeur d'absorbance égale à la moitié de sa valeur maximale, qui est également sa valeur finale.

Sur le graphique $A(t)$ tracé ci-dessous on mesure $A_{max} = 0{,}8$ et $t_{1/2} = 8$ min pour $A = 0{,}4$.



b. Pour réduire $t_{1/2}$, on peut augmenter la température. On peut également modifier les concentrations initiales en réactifs mais on ne peut prévoir l'effet de ces modifications sur $t_{1/2}$.

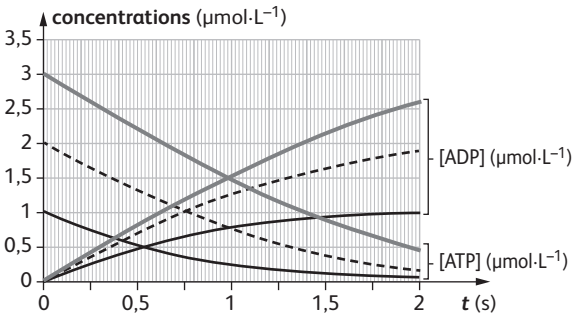
25. Catalyse enzymatique

> COMPÉTENCES : **Réaliser, analyer.**

a. Les données du tableau permettent de calculer à chaque instant la concentration en ATP restante :

$[ATP] = [ATP]_0 - [ADP]$ où $[ATP]_0$ est la concentration initiale en ATP.

b.



Pour cette réaction, le temps de demi-réaction est la durée nécessaire à la consommation de la moitié de l'ATP. Expérience 1 : 0,5 s ; expérience 2 : 0,75 s ; expérience 3 : 0,95 s.

c. La concentration initiale en ATP est un facteur cinétique : plus elle est grande, plus le temps de demi-réaction est grand.

26. Le chant du styrène

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître.**

a. Un catalyseur est une espèce chimique qui diminue la durée d'une transformation chimique.

b. Il s'agit d'une catalyse hétérogène car réactif et catalyseur sont dans des états physiques différents : le réactif, l'éthylbenzène, est liquide tandis que les catalyseurs, l'oxyde de zinc ou l'oxyde de magnésium, sont solides.

27. ★ Choisir une durée de transformation

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

a. Les molécules dont les temps de rétention sont 1,3 min et 2,4 min sont présentes initialement dans le milieu réactionnel. Il s'agit donc de l'alcool *A* et du catalyseur. On note aussi que la molécule dont le temps de rétention est de 2,4 min est présente à tout instant de la transformation. Or, un catalyseur se régénère tandis qu'un réactif est consommé. On en déduit qu'il s'agit du catalyseur TEMPO, et par suite que l'autre molécule est l'alcool *A*.

Par ailleurs, la molécule de temps de rétention 1,9 min n'était pas présente initialement. On en déduit qu'il s'agit d'un produit de la réaction. Comme le pic de temps de rétention 1,0 min est attribué à la cétone *B*, on en déduit que la molécule *C* a un temps de rétention de 1,9 min.

Le tableau ci-dessous regroupe ces conclusions :

Temps de rétention	1,3 min	1,9 min	2,4 min
Molécule	*C*	*A*	TEMPO

b. À $t = 15$ h, les pics mettent en évidence la présence des produits *B* et *C* recherchés mais également celle du réactif *A* qui n'a pas été totalement consommé. Hugo décide de rajouter le second réactif (BAIB) pour consommer tout le réactif *A* restant. À $t = 18$ h, il n'y a plus de réactif *A*, la réaction est donc terminée.

28. ★ Pasteur et les fermentations

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, valider, communiquer.**

a. Une levure est un champignon unicellulaire.

b. Les levures sont observables au microscope optique (taille d'environ 10 µm), appareil couramment utilisé à l'époque de Pasteur.

c. Le sucre est transformé en deux molécules : éthanol et dioxyde de carbone. Pour Pasteur, il se dédouble.

Remarque : aujourd'hui, le terme « dédoublement » a une signification bien précise sans rapport avec la signification donnée par Pasteur.

d. La levure produit une enzyme qui catalyse la réaction de « dédoublement du sucre », ce qui correspond à l'hypothèse de Pasteur selon laquelle « la levure produit une matière, telle que la pepsine, qui agit sur le sucre ». Toutefois, elle ne « disparaît [pas] aussitôt » car elle est en fait régénérée ; mais sa quantité est tellement faible que sa présence ne pouvait pas être mise en évidence à l'époque de Pasteur.

e. Les fermentations utilisent des enzymes produites par des levures comme catalyseurs. Toutefois, seules les enzymes sont nécessaires, contrairement à la présence des levures qui les produisent. La fermentation peut donc s'opérer sans phénomène physiologique.

f. L'élève doit rédiger un paragraphe structuré et utiliser du vocabulaire précis et scientifique.

Voici un exemple de ce qui serait attendu :

Une démarche scientifique consiste en l'observation de processus, la proposition de modèles pour les expliquer et la validation de ces modèles par la réalisation d'expériences. Il s'agit de plusieurs allers-retours afin de proposer des modèles et des lois mathématiques toujours plus proches de l'observation, sans en réfuter aucun a priori. Cette symbiose entre pratique et théorie permet de repousser les limites des connaissances. Les modèles et théories ont également pour objectif de prédire des phénomènes.

C'est bien la démarche de Pasteur qui propose plusieurs modèles pour justifier ce qu'il observe, et n'en écarte aucun a priori, tant que des expériences ne viennent les confirmer ou les invalider.

29. ★ Posologie d'un traitement antibiotique

> COMPÉTENCES : **Réaliser, analyser, communiquer.**

a. Pour un patient de 70 kg, la quantité d'antibiotique dans le corps (en le supposant uniformément réparti) doit être de $70 \times 2 = 140$ mg.

S'il prend un comprimé de 400 mg (ce qui correspond à une concentration c_0), l'antibiotique n'est plus efficace lorsque sa concentration est inférieure à une masse de 140 mg d'antibiotique réparti dans le corps, ce qui correspond à une concentration c vérifiant $\frac{c}{c_0} = \frac{140}{400} = 0{,}35$.

Sur le graphique, déterminons la durée t_d pour laquelle $\frac{c}{c_0} = 0{,}35$.

On lit 9,6 h, ce qui correspond à l'instant où le patient doit reprendre de l'antibiotique.

Le patient doit donc prendre un comprimé de 400 mg toutes les 9 à 10 h.

b. La lecture de t_d sur la courbe à 39 °C conduit à $t_d = 7{,}5$ h. Cet intervalle de temps est plus court parce qu'à une température plus élevée, les réactions de dégradation de l'antibiotique par l'organisme sont plus rapides.

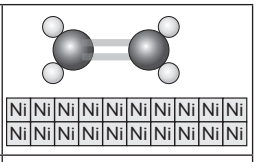
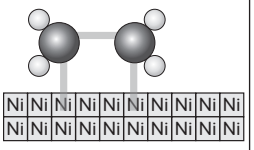
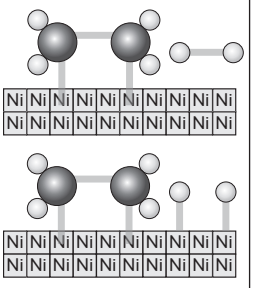
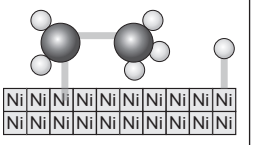
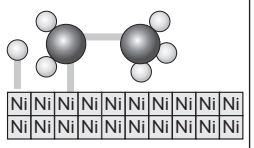
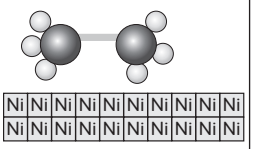
c. Le paragraphe rédigé par l'élève doit être court et précis. Il doit inclure une posologie simple. Le paragraphe doit également comporter une explication de la posologie, comme par exemple :

Tant que votre température n'est pas stabilisée à 37 °C, prenez un comprimé toutes les 7 heures (un premier vers 7 h du matin, un second vers 14 h, un troisième vers 21 h). Puis, espacez jusqu'à 10 h (le premier à 7h du matin et le second à 17 h) pendant deux jours.

L'antibiotique n'est efficace que pendant 7 h 30 tant que votre température est de 39 °C. Son efficacité augmente de deux heures quand votre température est de 37 °C.

30. ★ In English Please

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer**

	
Ethene molecules are adsorbed on the surface of the nickel. The double bond between the carbon atoms breaks and the electrons are used to bond it to the nickel surface.	
Hydrogen molecules are also adsorbed onto the surface of the nickel. When this happens, the hydrogen molecules are broken into atoms.	
These atoms can move around on the surface of the nickel.	
If a hydrogen atom diffuses close to one of the bonded carbons, the bond between the carbon and the nickel is replaced by one between the carbon and the hydrogen.	
That end of the original ethene now breaks free of the surface, and eventually the same thing will happen at the other end. As before, one of the hydrogen atoms forms a bond with the carbon, and that end also breaks free.	

31. ★★ S'auto-évaluer

Dès que débute la réaction (**1**), elle produit du diiode qui devrait colorer la solution en bleu. Toutefois, le diiode produit est très rapidement consommé par la réaction (**2**) qui consomme également le thiosulfate introduit. Lorsque tout le thiosulfate a été consommé, le diiode formée par (**1**) colore la solution en bleu.

La durée de la réaction est donc définie comme l'instant où le diiode produit par (**1**) a permis la consommation totale de la quantité n_0 d'ions thiosulfate introduits.

D'après l'équation de la réaction (**2**), pour consommer tous les ions thiosulfate, il faut une quantité de I_2 égale à $\frac{n_0}{2}$.

Il est donc nécessaire que la quantité d'ions iodure introduite soit suffisante pour former cette quantité de diiode.

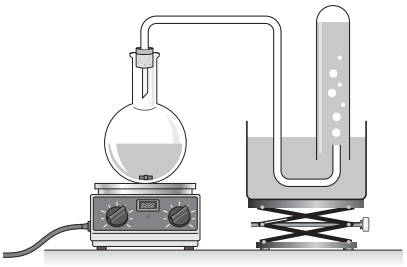
Or, la quantité maximale de diiode produite par la réaction (**1**) est égale à $\frac{c_1 V_1}{2}$.

Le protocole n'a donc de sens que si $\frac{c_1 V_1}{2} > \frac{n_0}{2}$, soit $n_0 < c_1 V_1$.

32. ★★ Décomposition de l'eau oxygénée

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider, communiquer.**

a. On peut recueillir le gaz par déplacement d'eau :



Un tube à essais gradué rempli d'eau est renversé sur une cuve remplie d'eau. Un tube coudé relie le ballon fermé dans lequel la réaction a lieu et conduit le gaz formé dans le tube. Le gaz déplace l'eau qui descend dans la cuve. Si le tube est gradué en volume, le volume de dioxygène formé peut être mesuré.

b. Il faut tout d'abord construire un tableau d'avancement pour cette réaction.

	avancement	$2H_2O_2(aq) \rightarrow O_2(g) + 2H_2O(\ell)$		
état initial	0	$n_0 = c_0 V_0$	0	excès
en cours	x	$n_0 - 2x$	x	excès
état final	x_f	$n_0 - 2x_f = 0$	x_f	excès

L'avancement maximal est égal à l'avancement final et vérifie $x_f = \frac{n_0}{2} = \frac{c_0 V_0}{2} = 0{,}48$ mmol, ce qui correspond à un volume de dioxygène formé $V_f = \frac{x_f RT}{P} = 11{,}7$ mL.

c. Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour que l'avancement soit égal à la moitié de son avancement final, soit $x = \frac{x_f}{2}$ et $V = \frac{V_f}{2} = 5{,}8$ mL.

d. D'après le tableau, $t_{1/2}$ est légèrement supérieur à 47 s.

e. La durée de la transformation est diminuée lorsque la concentration en enzyme est augmentée, jusqu'à une certaine valeur minimale.

Les enzymes sont sensibles aux variations de température. Si la température est diminuée, leur efficacité baisse et la durée de la transformation augmente.

33. ★★ Une synthèse industrielle

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser.**

a. La synthèse industrielle n'est pas réalisée à température trop élevée car le rendement de la synthèse diminue au-delà de 700 °C. Par ailleurs, le coût énergétique devient trop important.

b. Les réactifs sont gazeux et le catalyseur est solide, il est donc dans une phase différente des réactifs. Il s'agit de catalyse hétérogène.

c. L'équation de la première étape traduit la consommation d'une molécule de SO_2 et la formation d'une molécule de SO_3. La régénération du catalyseur doit s'accompagner de la consommation de O_2 qui figure dans l'équation de la réaction. On peut donc proposer :

$$2\ V_2O_4(s) + O_2(g) \rightarrow 2\ V_2O_5(s)$$

L'équation de la réaction s'obtient en faisant deux fois la première étape et une fois la seconde

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

34. CATALYSE AU SEIN DES BIOPILES AU GLUCOSE

> COMPÉTENCES : **Réaliser, valider.**

1. En comparant les évolutions temporelles de la concentration en dioxygène, on note que la transformation est plus courte lorsque la concentration en glucose oxydase est plus élevée. On en déduit que cette enzyme joue le rôle de catalyseur pour cette transformation.

2. Le temps de demi-réaction désigne la durée de la transformation pour laquelle l'avancement est égal à la moitié de l'avancement final. La courbe rouge correspond à la concentration la plus élevée en enzyme. On peut supposer qu'à terme cette courbe sera très proche de l'axe des abscisses, c'est-à-dire que la concentration en dioxygène sera nulle, ou encore que l'avancement final sera égal à l'avancement maximal.

On détermine alors la durée pour laquelle la concentration en dioxygène est égale à 125 mol·L^{-1} $\left(= \frac{250}{2}\right)$. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Concentration en enzyme	$\frac{c}{8}$	$\frac{c}{4}$	$\frac{c}{2}$	c
Temps de demi-réaction	Supérieur à 175 s	Environ 150 s	100 s	Environ 70 s

On constate que le temps de demi-réaction diminue lorsque la concentration en enzyme augmente.

3. Plus la quantité de glucose devant être oxydée est grande, plus le débit d'électrons sera important et donc plus l'intensité sera élevée. D'après les réponses précédentes, l'intensité du courant est d'autant plus élevée que la concentration en enzyme l'est aussi.

35. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

D'une odeur âcre à une odeur fruitée

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider, communiquer.**

1.

Expérience	**a**	**b**	**c**	**d**	**e**
Température	50 °C	20 °C	50 °C	20 °C	20 °C
Catalyseur	Non	Oui	Oui	Non	Oui
Stœchiométrie	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
$t_{1/2}$ (min)	6	2	1	18	5

2. Influence de la température : expériences **b** et **c** à comparer ; plus la température est élevée et plus la durée de la transformation est faible. La température est un facteur cinétique.

Influence du catalyseur : expériences **a** et **c** à comparer ; le catalyseur permet de diminuer la durée de la transformation.

Influence de la stœchiométrie : expériences **b** et **e** à comparer ; lorsque l'un des réactifs est limitant, la durée de la transformation est augmentée.

3. Du point de vue de la cinétique, les conditions optimales de cette synthèse sont les suivantes :

– 50 °C ;
– avec acide sulfurique ;
– mélange initial stœchiométrique.

Du point de vue du rendement, les conditions optimales sont les suivantes :

– 50 °C ;
– avec acide sulfurique,
– mélange initial non stœchiométrique.

36. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Les plans d'expérience

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

1. Les conditions initiales diffèrent par la concentration initiale en éthène qui est le paramètre étudié.

2. Il faut réaliser les expériences en ne faisant varier qu'un seul paramètre.

Par exemple, si on choisit d'analyser l'influence de la concentration initiale en dioxygène dissous, il faut que les trois autres paramètres restent inchangés. Or, la concentration en dioxygène aqueux est proportionnelle à la pression de l'air qui surmonte la solution. Ainsi, pour la modifier, il faut modifier la pression. On peut par exemple choisir les conditions de l'expérience 3 du tableau ci-dessous.

Expérience	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Pression	10 bar	10 bar	5 bar	10 bar	10 bar
Concentration initiale en éthène	1,0 mmol·L^{-1}	0,1 mmol·L^{-1}	1,0 mmol·L^{-1}	1,0 mmol·L^{-1}	1,0 mmol·L^{-1}
Concentration en chlorure de palladium	2,0 mmol·L^{-1}	2,0 mmol·L^{-1}	2,0 mmol·L^{-1}	5,0 mmol·L^{-1}	2,0 mmol·L^{-1}
Température	40°C	40°C	40°C	40°C	30°C
Paramètre étudié		concentration initiale en éthène	concentration initiale en O_2	concentration en chlorure de palladium	température

3. Il faut une expérience témoin (ici l'expérience **1**), puis une expérience par paramètre à tester (pour chaque expérience, on ne fait varier qu'un seul paramètre par rapport à l'expérience témoin). Il faut donc $k + 1$ expériences.

37. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Décomposition du peroxyde d'hydrogène

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

CHAPITRE

13

COMPRENDRE

Stéréoisomérie des molécules organiques

> Manuel pages 290 à 311

Choix pédagogiques

Dans la partie du programme : « Structure et transformation de la matière », la représentation spatiale des molécules est indispensable pour interpréter certaines propriétés des molécules.
Il s'agit ici du troisième chapitre de chimie dans la progression du manuel :
– on s'appuiera sur les acquis du chapitre 5 (Molécules organiques : linéaires et ramifiées, groupes caractéristiques, classes fonctionnelles. Formule topologique – Nomenclature IUPAC) ;
– l'introduction à la cinétique chimique présentée chapitre 12 n'est pas réinvestie dans ce chapitre 13, mais la présentation de la spécificité de certaines réactions pourra éclairer sur le rôle et le choix des catalyseurs biologiques, les enzymes.
L'entrée dans le chapitre se fait par la présentation de la convention de Cram, choisie pour la représentation spatiale des molécules ; on abordera ensuite les stéréoisoméries de conformation sur des exemples simples avant de présenter les stéréoisoméries de configuration.
Remarque de vocabulaire : il a été choisi de parler de *stéréoisomérie* de conformation et non de *conformation* (seule) car il existe une ambiguïté sur ce terme que l'on peut retrouver chez les plus célèbres auteurs de stéréochimie (en particulier Eliel).
Conformément au programme on prendra le plus souvent des exemples dans le domaine de la biologie, où les conformations et les configurations des molécules ont une grande importance.
Des animations illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Personne en train de prendre un selfie : l'image (1) sur la tablette représente la personne telle qu'elle serait vue dans un miroir.

> ***Les images (1) et (2) sont différentes. Y a-t-il des molécules qui ne se superposent pas à leur image dans un miroir ?***

En se prenant en selfie avec un smartphone, afin de ne pas perturber l'auteur de la photo, celui-ci se voit comme dans un miroir. Une fois la photographie réalisée, celle-ci apparaît « normalement » sur l'écran.
Un enfant à qui on demande ce qu'il voit dans un miroir répondra qu'il se voit lui-même et pensera instinctivement que son image spéculaire est exactement la même que son image directe. Si toutefois sa coiffure ou ses vêtements présentent une dissymétrie, on pourra lui faire remarquer que la gauche et la droite sont inversées. Cette propriété se retrouve de la même manière à l'échelle moléculaire : certaines molécules ne se superposent pas à leur image dans un miroir.
L'enseignant peut alors, suivant le temps dont il dispose, proposer aux élèves de décrire les objets macroscopiques de la classe qui ne sont pas superposables à leur image dans un miroir, puis d'imaginer des objets à l'échelle moléculaire qui présentent cette propriété.

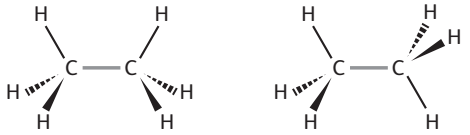
ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Différentes conformations d'une molécule

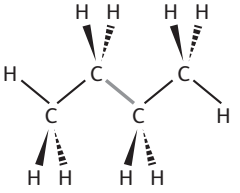
Réponses

RÉALISER

1. a. Réaliser l'expérience.
b. Deux conformations de la molécule d'éthane :

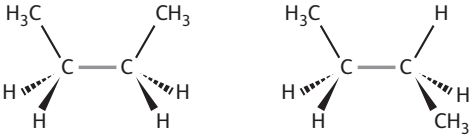


Conformations de la molécule de butane : une première représentation est possible.

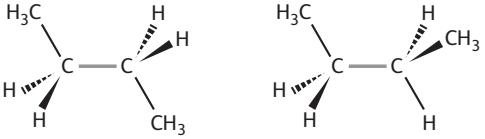


On peut alors faire remarquer à l'élève que les groupes $-CH_3$ peuvent être représentés de manière compacte (semi-développée) :

Conformations éclipsées



Conformations décalées

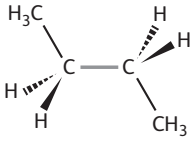


Seules deux réponses étaient attendues.

ANALYSER

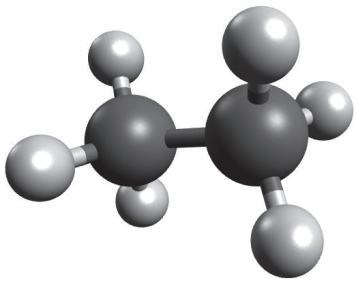
2. a. Le passage d'une conformation à l'autre ne nécessite pas de rupture de liaison.

b.

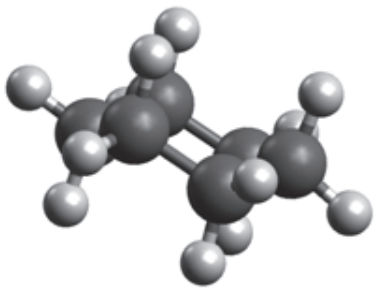


RÉALISER

3. a.



b.



ANALYSER

4. a. Le terme « décalé » pour désigner cette particularité des liaisons C–H de deux atomes de carbone voisins est particulièrement adapté : le 2e atome de carbone semble avoir tourné ou s'être « décalé » de 1/6e de tour (ou 60° d'angle) par rapport au précédent.

b. On retrouve bien cette propriété de décalage des liaisons dans la conformation du cyclohexane calculée par ordinateur.

VALIDER

5. Vue sous un certain angle (schéma de la réponse **3. b.**), la molécule de cyclohexane de conformation « décalée » ressemble à un petit fauteuil, d'où le nom de « conformation chaise ».

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

Construire des stéréoisomères de configuration

Commentaires

L'objectif de cette activité est de mettre en évidence les notions de carbone asymétrique et de chiralité pour une molécule.

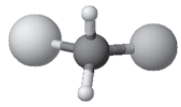
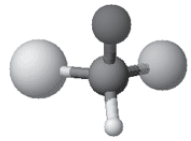
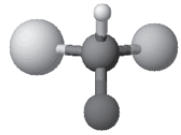
Réponses

RÉALISER

1. Réaliser l'expérience.

ANALYSER

2. a. Pour (*A*), tous les modèles sont superposables.
Pour (*B*), tous les modèles ne sont pas superposables. Il en existe deux différents.
Pour (*B*), on ne peut pas passer de l'un à l'autre sans rompre de liaison.

Molécule (*A*) : CH_2BrCl	Molécule (*B*) : CHClFBr
	
	

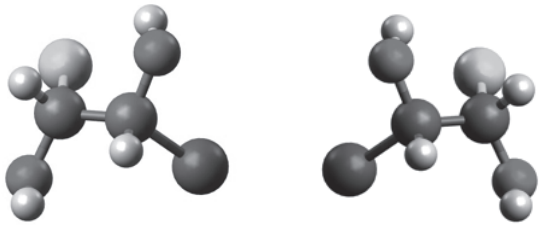
b. La molécule (*A*) possède un plan de symétrie passant par les atomes C, H et H.

COMMUNIQUER

3. Dans les deux molécules, l'atome de carbone est tétraédrique (lié à 4 atomes).
Dans la molécule (*A*), l'atome C central est lié à deux atomes d'hydrogène, un atome de chlore et un atome de brome : les 4 atomes ne sont pas différents.
Dans la molécule (*B*), l'atome C central est lié à un atome d'hydrogène, un atome de chlore, un atome de brome et un atome de fluor : les 4 atomes sont différents.
L'atome de carbone de la molécule (*B*), dit asymétrique, est au centre d'un tétraèdre et lié à 4 atomes différents.

RÉALISER

4. a. et **b.**

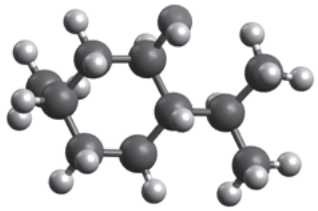


ANALYSER

5. a. Les deux structures créées ne sont pas superposables.
b. On ne peut pas passer de l'une à l'autre sans rompre de liaison.
c. Au total, la classe peut créer jusqu'à quatre structures différentes.

RÉALISER

6. Il y a 7 réponses possibles dont :



3. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Différentes propriétés des diastéréoisomères

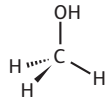
Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guide élève et professeur sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

EXERCICES Appliquer le cours

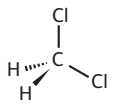
Représentation spatiale des molécules (§1 du cours)

13. Dessiner en représentation de Cram

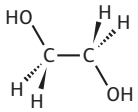
a.



b.

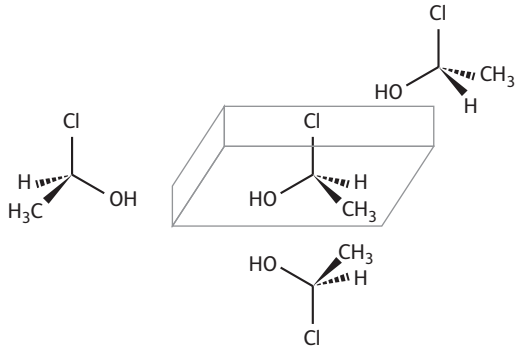


c.



14. Dessiner des images dans un miroir

a. et **b.**

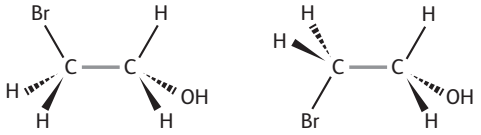


c. Les trois structures dessinées sont identiques.

Stéréoisomérie de conformation (§2 du cours)

15. Représenter des conformations

Conformères du 2-bromoéthane-1-ol (parmi les réponses possibles)



Stéréoisomérie de configuration (§3 du cours)

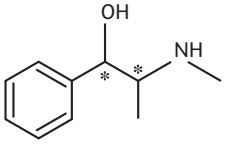
16. Identifier des atomes de carbone symétriques

a. $CH_3-C^*HBr-CH_2Br$
b. $CH_2Br-CHBr-CH_2Br$
c. $CH_3-C^*HBr-C^*H(OH)-CH_3$
d. $CH_3-CH_2-C^*HCl-CH_3$

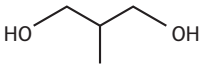
17. Chercher des atomes asymétriques

Les C asymétriques sont notés *.

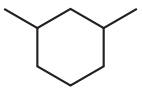
a.



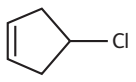
b.



c.



d.

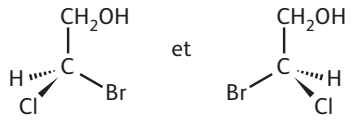


18. Reconnaître des espèces chirales

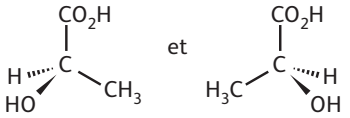
La première molécule est achirale. Les deux autres sont chirales.

19. Représenter des énantiomères

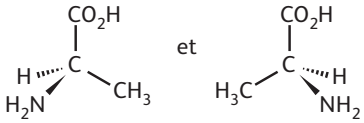
a.



b.

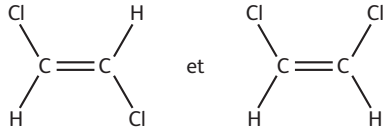


c.

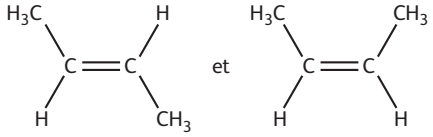


20. Reconnaître des diastéréoisomères

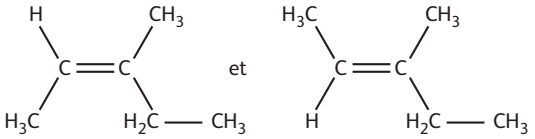
a. Oui.



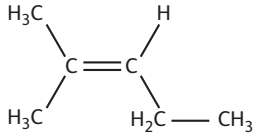
b. Oui.



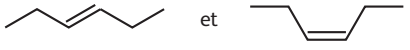
c. Oui.



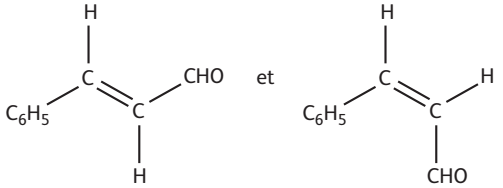
d. Non.



e. Oui.



f. Oui.

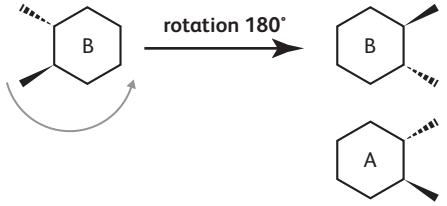


21. Reconnaître des stéréoisomères

a. Les molécules sont images l'une de l'autre dans un miroir plan vertical et perpendiculaire au plan de la feuille.



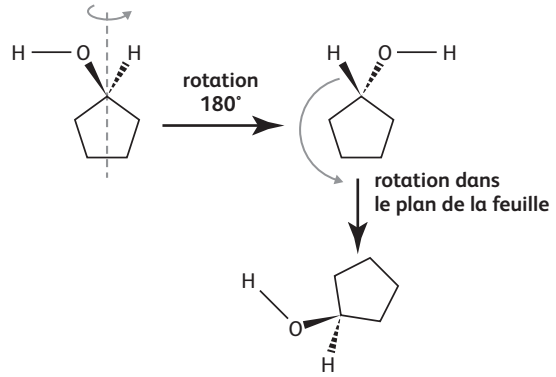
La structure *B* obtenue n'est pas superposable à *A*.



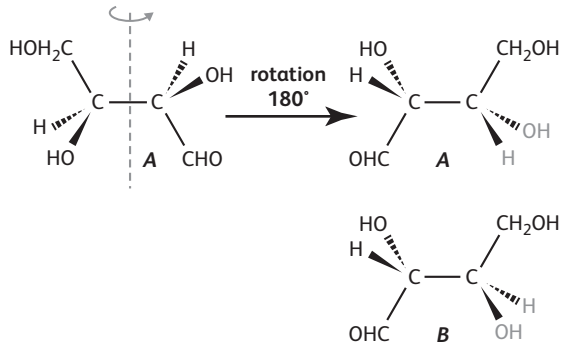
Les deux molécules sont donc énantiomères l'une de l'autre.

b. Les molécules sont des diastéréoisomères l'une de l'autre (isomérie *Z*/*E*).

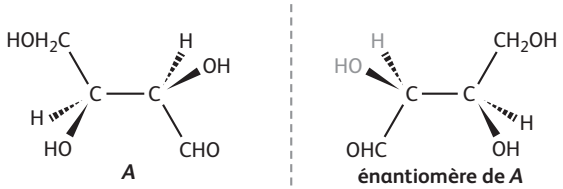
c. Les deux molécules représentées sont identiques. On passe de l'une à l'autre en changeant l'angle de vue.

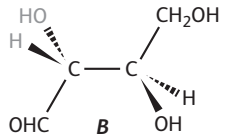


d. Les deux structures ne sont pas identiques car deux groupes ne sont pas à la même position sur les deux molécules.



L'énantiomère de *A* n'est pas superposable à *B*.





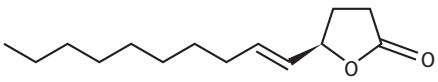
Les deux molécules sont donc diastéréoisomères l'une de l'autre.

EXERCICES S'entraîner

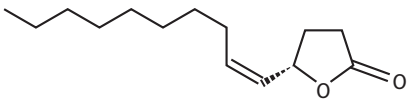
22. Exercice résolu dans le manuel

23. Application de l'exercice résolu

1. Cette molécule fait partie d'un couple de stéréoisomères *Z*/*E*.
Son diastéréoisomère *Z*/*E* est :



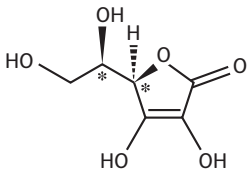
2. Son énantiomère est :



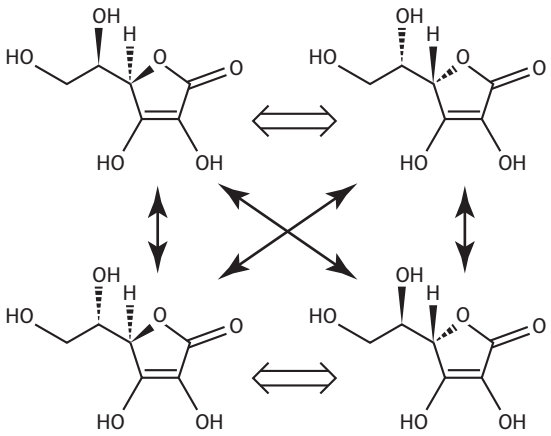
24. Exercice résolu dans le manuel

25. Application de l'exercice résolu

1. Les deux atomes de carbone asymétriques sont notés par * :



2. Les stéréoisomères de configuration sont :



3.
⟺ : énantiomères
⟷ : diastéréoisomères

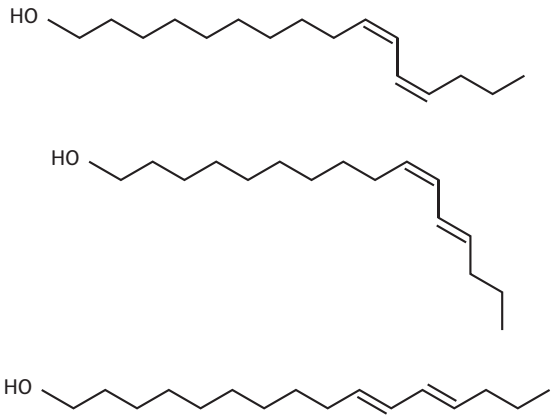
26. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a. On compte 16 atomes de carbone d'où hexadéca.
On remarque un groupe caractéristique OH, en première position d'où -1-ol.
On note deux doubles liaisons, l'une en 10e position (à partir du OH) et l'autre en 12e position d'où 10,12-dièn.
Les lettres *E* et *Z* sont admises sans plus d'explication.

b. Cette molécule ne présente pas d'atome de carbone, tétraédrique lié à 4 groupes différents : elle ne présente pas d'atome de carbone asymétrique.

c. Chaque double liaison peut, si les groupes liés sont différents, être à l'origine de deux diastéréoisomères.
Il y a 4 combinaisons possibles de 2 doubles liaisons sur deux positions (10 et 12).



27. Analyser des modèles moléculaires

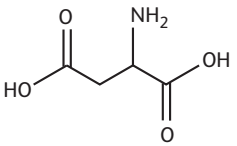
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

ⓐ et ⓓ sont chirales.

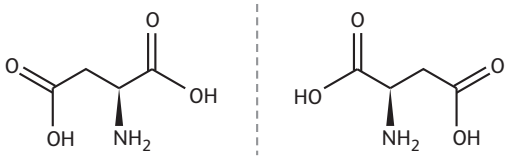
28. Représenter un acide α-aminé

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. Formule semi-développée :
$HOOC-CH_2-CH(NH_2)-COOH$
Formule topologique :



b. Le carbone asymétrique est le carbone portant le groupe caractéristique amino (NH_2) car il est tétraédrique et lié à 4 groupes d'atomes différents.
Les deux énantiomères sont représentés ci-dessous :



29. Exploiter des textes de vulgarisation

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

a. Phrase 1 du document 1 : « *Les propriétés pharmacologiques de deux énantiomères peuvent être très différentes.* »

Informations du document 2 : « *L'activation d'un récepteur ne peut se faire que par une molécule ayant des affinités pour lui et qui se fixera à lui.* »

On imagine bien que, si l'énantiomère (*A*) peut activer le récepteur (R_A), l'autre énantiomère (*B*) ne puisse pas activer ce même récepteur pour des raisons de géométrie dans l'espace et qu'il pourrait activer un autre récepteur (R_B) : les actions de (*A*) et (*B*) peuvent alors être très différentes.

b. Une espèce « énantiopure » ne contient qu'un seul énantiomère d'une molécule chirale.

c. Si, comme dans le cas imaginé en **a.**, les énantiomères (*A*) et (*B*) d'une molécule chirale activent des récepteurs R_A et R_B différents et que la thérapie recherchée nécessite l'activation de R_A seul, il faut prescrire une préparation ne contenant que l'énantiomère *A*, donc une préparation énantiopure ; un racémique est un mélange de deux énantiomères d'une même molécule, ce qui est à proscrire ici.

30. Influence du LSD

> COMPÉTENCES : **Analyser, communiquer.**

a. La structure en trois dimensions de la partie entourée en jaune de la molécule de LSD est identique à la structure de la partie activante de la molécule de sérotonine (à droite sur le schéma de gauche).

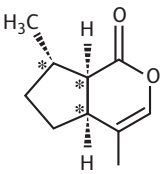
b. Les perturbations de la vision sont dues à l'action du LSD sur les synapses à sérotonine du cerveau : la molécule de LSD, dans la partie entourée en jaune sur le schéma, a une structure tridimensionnelle très proche de celle de la sérotonine, le neurotransmetteur normal de la vision. Elle va donc se lier aux récepteurs à sérotonine des neurones post-synaptiques, mais avoir une action à la fois plus importante et plus longue.

31. In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

a. Seul l'isomère A de la nepetalactone a un effet sur le comportement des chats ; l'isomère B est inactif.

b. Les atomes de carbone asymétriques sont tétraédriques et liés à 4 groupes d'atomes différents. On les pointe par *. Il y a 3 atomes de carbone asymétriques.



c. Les isomères ***A*** et ***B*** sont énantiomères car images l'un de l'autre dans un miroir et non superposables (il faut imaginer le miroir comme confondu avec le plan de la page).

32. Gastronomie et isoméries

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. Lorsqu'une protéine se déroule, il n'y a pas de rupture de liaison covalente.

Les structures initiales et finales n'ont pas la même forme.

Il s'agit d'isomérie de conformation, résultant de la libre rotation autour de liaisons simples entre atomes de carbone C–C.

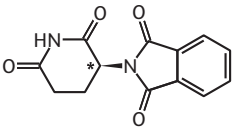
b. À une température supérieure à 100 °C, les œufs deviennent vraiment « durs » (caoutchouteux).

À une température de l'ordre de 68 °C, les œufs sont « mollets » : « le blanc est pris, mais délicat, et le jaune est resté liquide avec son goût de jaune frais ».

33. Un problème de santé publique

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a. L'atome de carbone asymétrique est l'atome de géométrie tétraédrique lié à quatre atomes ou groupes d'atomes différents. Il est noté par * sur la formule topologique de la molécule.

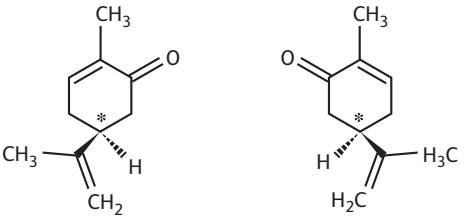


b. Dans les années 1960 les femmes enceintes ont absorbé le mélange de la molécule à effet thérapeutique et de la molécule conduisant aux malformations de l'embryon.

34. Propriétés biologiques des stéréoisomères

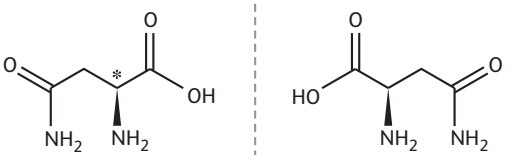
> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a. Les deux énantiomères de la carvone ; le carbone asymétrique est indiqué par une étoile.



À gauche, l'isomère présent dans le cumin, à droite celui à odeur de menthe.

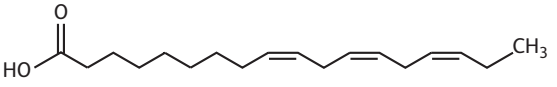
b. La molécule d'asparagine : le carbone asymétrique est repéré par une étoile. Les deux structures sont images l'une de l'autre dans un miroir plan : ce sont des énantiomères.



35. ★ Acide gras insaturé

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a.



b. À partir du CH_3, on trouve :
– une double liaison en 3° position d'où ω3 ;
– une double liaison en 6° position d'où ω6 ;
– une double liaison en 9° position d'où ω9.
c. Il s'agit de diastéréoisomères.

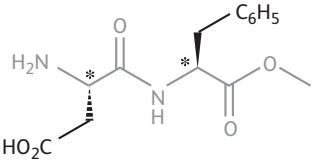
	ω3	ω6	ω9
Géométrie autour des différentes C=C	*Z*	*Z*	*Z*
	Z	*Z*	Non *Z* (*E*)
	Z	Non *Z* (*E*)	Non *Z* (*E*)
	Z	Non *Z* (*E*)	*Z*
	Non *Z* (*E*)	*Z*	*Z*
	Non *Z* (*E*)	*Z*	Non *Z* (*E*)
	Non *Z* (*E*)	Non *Z* (*E*)	Non *Z* (*E*)
	Non *Z* (*E*)	Non *Z* (*E*)	*Z*

On trouve 8 combinaisons possibles de 2 caractères (*Z* et *E*) sur 3 centres.

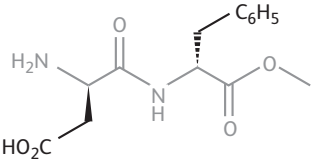
36. ★ L'aspartame

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

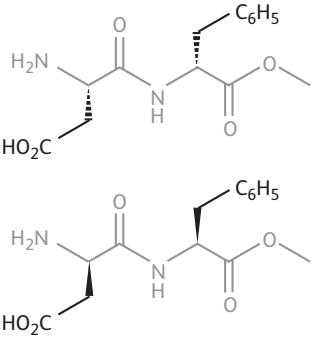
a. On met en évidence 2 atomes de carbone asymétriques dans cette molécule (notés *).



b. Pour observer cet énantiomère sur un miroir, il faudrait que le miroir soit confondu avec le plan de la feuille.



c. Ces deux molécules sont des diastéréoisomères de l'aspartame ; elles sont énantiomères entre elles.

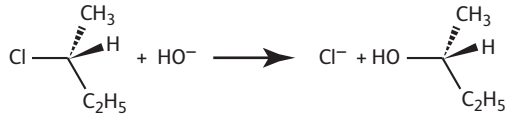


d. Les récepteurs du goût sont spécifiques puisque des molécules de structure spatiale différente (stéréoisomères) n'agiront pas sur les mêmes récepteurs et provoqueront une réponse sensorielle différente (sucrée ou amère).

37. ★ Exploiter des documents

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. Dans le 2-chlorobutane et dans le butan-2-ol, le carbone portant le groupe caractéristique (Cl ou OH) est un carbone tétraédrique lié à 4 groupes différents : il est asymétrique.
b. La molécule de 2-chlorobutane représentée est chirale puisqu'elle contient un seul atome de carbone asymétrique.
c.

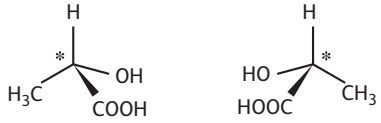


d. On voit que le produit de l'action sur l'énantiomère du réactif de référence est l'énantiomère du produit de référence : la configuration du produit synthétisé dépend de la configuration du réactif, ce qui est la définition d'une réaction stéréospécifique.

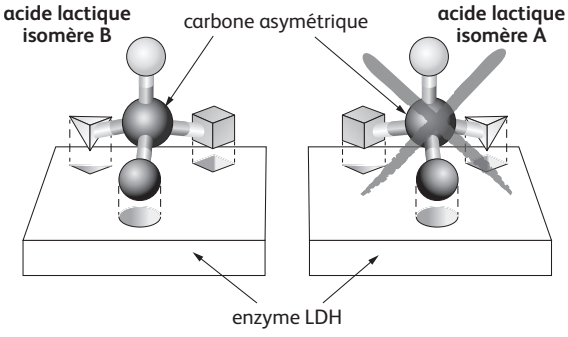
38. ★ Catalyse enzymatique

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a. L'acide lactique contient un atome de carbone asymétrique : c'est une molécule chirale dont les deux isomères sont représentés ci-dessous avec la représentation de Cram :



b. L'isomère représenté dans le document 2, oxydé en présence de LDH, est le stéréoisomère B du document 1.
c. Les deux stéréoisomères de l'acide lactique sont chimiquement oxydables de façon identique ; mais leur oxydation est lente. On peut accélérer une transformation à l'aide d'un catalyseur (voir chapitre 12) enzymatique (ici la LDH) qui est un enchaînement d'acides aminés avec une géométrie particulière et qui n'agit que sur des stéréoisomères du fait de sites spécifiques, propriété que l'on peut schématiser ainsi :



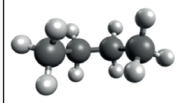
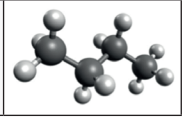
d. La main humaine est un objet chiral puisqu'elle n'est pas identique à son image dans un miroir ! Les deux énantiomères sont la main gauche et la main droite.
– Si une main interagit avec un objet achiral comme une balle sphérique, l'interaction est identique entre la main gauche et la balle ou entre la main droite et la balle.

– Si la main interagit avec un objet chiral, comme un gant : seule la main droite rentre dans le gant droit et la main gauche dans le gant gauche ; le gant, comme la LDH, se comporte comme un récepteur stéréospécifique. La même analyse peut être réalisée en analysant une poignée de main entre deux personnes.

39. ★ Conformation la plus probable

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

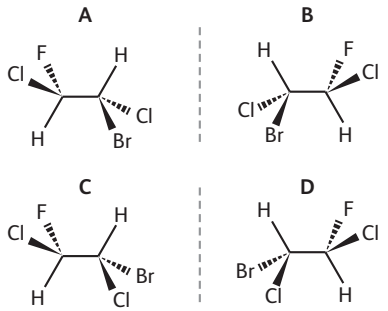
a. et **b.**

	représentation 3D	distance entre les deux atomes de carbone extrêmes (en nm)
éclipsée		0,30
décalée		0,38

c. La distance est plus grande dans la conformation décalée. C'est donc la conformation décalée qui est la plus stable et la plus probable.

40. ★★ S'auto-évaluer

Pour la molécule FClCH–CHBrCl, on trouve :



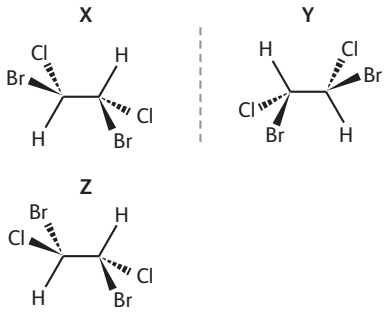
A et **B** sont images dans un miroir mais non superposables : énantiomères.

C est obtenu en échangeant les positions de Br et Cl sur le carbone 2 ; **A** et **C** ne sont pas identiques et ne sont pas images dans un miroir : ce sont des diastéréoisomères.

D est l'image de **C** dans un miroir et non superposable à **C** : **D** et **C** sont énantiomères.

D'où 4 stéréoisomères de configuration chiraux.

Pour la molécule BrClCH – BrClCH, on trouve :



Y est l'image de **X** dans un miroir et ne sont pas superposables : ce sont des énantiomères.

Z diastéréoisomère de **X**, est construite en échangeant Cl et Br sur le carbone 1 : **Z** possède un plan de symétrie, est identique à son image dans un miroir et n'est pas chirale. Cette molécule BrClCH – BrClCH a donc 3 stéréoisomères, deux chiraux et un achiral.

La différence mise en évidence entre les deux provient du fait que les atomes de carbone (1) et (2) de FClCH – CHBrCl sont liés à des atomes différents alors que les atomes de carbone (1) et (2) de BrClCH – BrClCH sont liés aux mêmes atomes H, Cl et Br ; ce qui donne un caractère symétrique à l'un des diastéréoisomères.

EXERCICES Objectif BAC

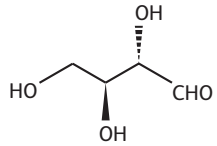
Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

41. ANALYSE ET RÉACTIONS DE CERTAINS GLUCIDES LÉGERS

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, connaître.**

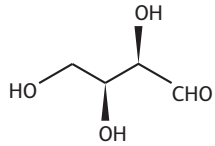
1. a. le D-érythrose et le D–thréose diffèrent par la configuration d'un seul atome de carbone symétrique. Ce sont des stéréoisomères qui ne sont pas images l'un de l'autre dans un miroir : ce sont des diastéréoisomères.

b.



L-érythose

2. a.

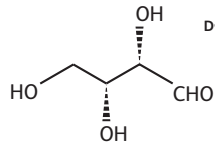


L-thréose

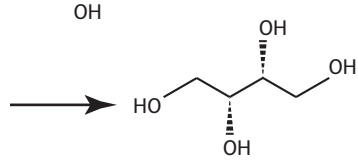
b. C'est un diastéréoisomère du D-érythrose.

c. La molécule présentée est l'énantiomère du D-thréose. Par analogie avec le L-érythrose qui est l'énantiomère du D-érythrose, ce dernier stéréoisomère est donc le L-thréose.

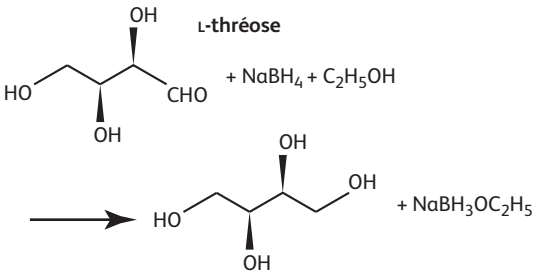
3. a.



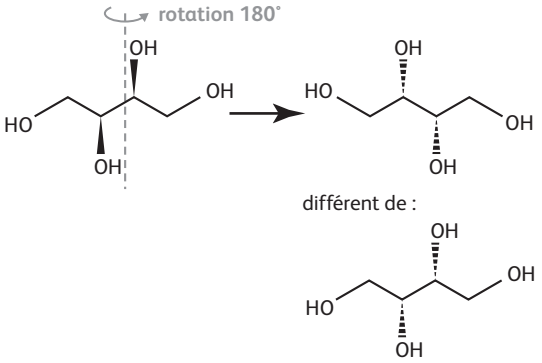
D-thréose + $NaBH_4$ + C_2H_5OH



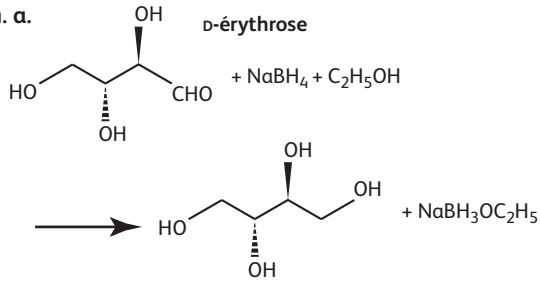
+ $NaBH_3OC_2H_5$

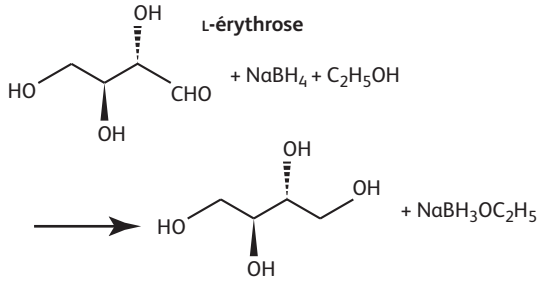


b. En imaginant que le miroir est confondu avec le plan de la feuille, on identifie bien que les deux molécules sont images l'une de l'autre dans un miroir.

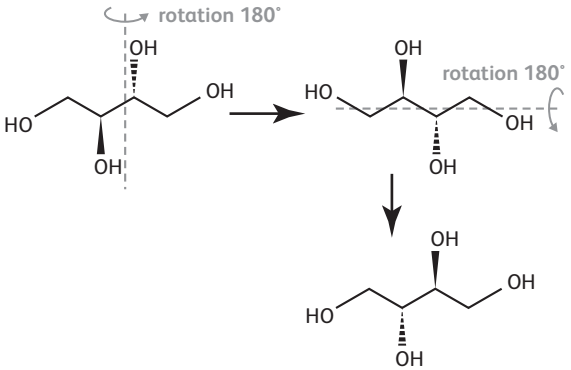


4. a.





b.



On constate que les deux molécules obtenues sont identiques.

c. La molécule formée présente deux atomes de carbone asymétriques mais est achirale car son image dans un miroir plan lui est superposable.

42. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Dédoublement des énantiomères

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

Le document 1 permet de définir un mélange racémique : un mélange en mêmes quantités des deux énantiomères d'un couple. Il précise pourquoi il est intéressant de réussir à séparer les deux énantiomères.

Le document 2 rappelle que deux énantiomères ont presque toutes leurs propriétés physiques identiques. Il est donc très difficile de les séparer par les méthodes traditionnelles (chromatographie sur support achiral, recristallisation, distillation, etc.).

Par contre, deux diastéréoisomères ont des propriétés physiques différentes, comme par exemple leur solubilité dans l'eau.

Le document 3 explique comment transformer un couple de deux énantiomères en deux molécules différentes diastéréoisomères entre-elles, qui pourront être séparées.

Un protocole possible

1. Dissoudre une quantité n du mélange racémique de l'acide 2-méthylbutanoïque dans de l'eau afin de former une solution saturée. Les deux espèces de ce mélange sont notées (*RA*) et (*SA*).

2. Ajouter une quantité n de (+)-1-phényléthan-1-amine notée *P*. Grâce à une réaction acide base, *RA* réagit avec *P* pour donner *RAP*, et *SA* réagit avec *P* pour donner *SAP*. *RAP* et *SAP* sont des stéréoisomères qui ne sont pas images l'une de l'autre dans un miroir : ce sont des diastéréoisomères.

3. Un des diastéréoisomères est certainement moins soluble dans l'eau que l'autre : il précipite (on suppose ici que c'est par exemple *RAP*). Séparer le solide du liquide par filtration.

4. Récupérer le filtrat et ajouter une quantité $\frac{n}{2}$ d'acide chlorhydrique en solution aqueuse afin de former une solution de *SA*.

5. Dissoudre le solide *RAP* et ajouter une quantité $\frac{n}{2}$ d'acide chlorhydrique en solution aqueuse afin de former une solution de *RA*.

Les deux énantiomères sont ainsi séparés.

CHAPITRE

14

COMPRENDRE

Transformations en chimie organique

> Manuel pages 312 à 333

Choix pédagogiques

Le cours de ce chapitre présente tout d'abord la nomenclature des espèces chimiques polyfonctionnelles (les espèces monofonctionnelles ont été traitées au chapitre 5 ainsi que dans la fiche méthode 1). Conformément au programme, nous ne cherchons pas à déterminer le nom d'une molécule à partir de sa structure mais les groupes caractéristiques et la chaîne carbonée d'une molécule à partir de son nom. Pour éviter l'aspect souvent considéré comme « rébarbatif » de ce domaine, nous nous sommes restreints au strict minimum : quelques approfondissements figurent dans la fiche méthode 1.

L'objectif de la deuxième partie du cours est de familiariser l'élève avec la lecture des formules (topologiques ou non) dans le but d'identifier les modifications opérées lors d'une transformation : c'est en effet le premier chapitre où la réactivité des molécules et leurs modifications sont envisagées. Les grandes catégories de réaction sont introduites : addition, élimination et substitution. Le classement se fait sans aucune considération mécanistique mais uniquement par comparaison entre le réactif et le produit ; nous avons choisi d'introduire la notion de réactif d'intérêt parce que dans la grande majorité des transformations, les réactifs n'ont pas le même statut et implicitement les modifications considérées sont celles du réactif d'intérêt.

Enfin, la partie finale est consacrée à un point de vue microscopique des transformations. Conformément au programme, on modélise les ruptures hétérolytiques de liaison par un mouvement de doublet d'électrons. La notion d'électronégativité introduite en 1re S est ici succinctement rappelée. À partir d'une liaison polarisée, on introduit la notion de donneur et d'accepteur de doublet d'électrons, notion que nous avons ensuite aisément généralisée aux atomes possédant un doublet non liant, une lacune électronique ainsi qu'aux doubles liaisons C=C.

Des animations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Attention à l'usage des aérosols qui contiennent du dichlorométhane.

La transformation responsable de la toxicité du dichlorométhane peut-elle être reproduite par le chimiste ?

Le métabolisme du dichlorométhane dans le corps humain produit du monoxyde de carbone qui empoisonne les cellules.

La photographie permet de sensibiliser les élèves à la toxicité des produits de leur quotidien. Elle permet également de revenir sur la nomenclature avec une molécule dont le nom est simple. Enfin, la transformation de CH_2Cl_2 en CO permet d'aborder la notion de transformation chimique.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Classer des transformations

Commentaires

Dans un premier temps, cette activité a pour objectif de familiariser les élèves avec la « lecture » d'une transformation chimique et de leur permettre d'identifier clairement ce qui est transformé et ce qui ne l'est pas. Les exemples choisis sont volontairement très simples et ne font intervenir que les classes fonctionnelles au programme.

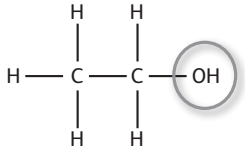
Dans un second temps, l'activité permet d'aborder la classification des transformations.

La dernière question permet de généraliser cet apprentissage de la « lecture » à des molécules plus complexes et biologiquement actives, conformément aux recommandations du programme. On peut à cette occasion faire remarquer que des molécules de structure voisine (testostérone et œstradiol) ont des propriétés biologiques très différentes.

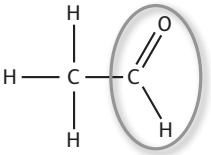
Réponses

S'APPROPRIER

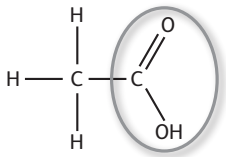
1. a.



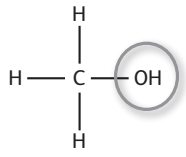
éthanol



éthanal



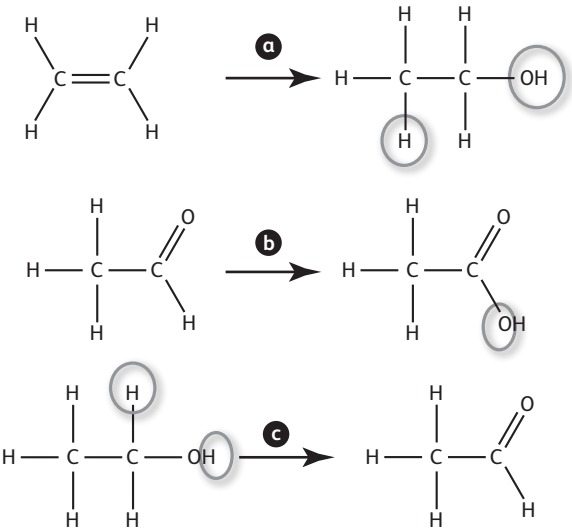
acide éthanoïque



méthanol

Remarque : la double liaison des alcènes n'est pas un groupe caractéristique.

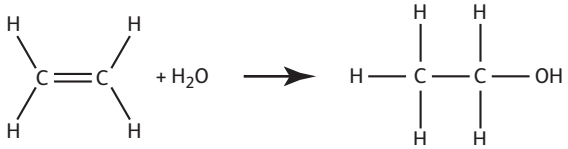
b. Les atomes en commun ne sont pas entourés :



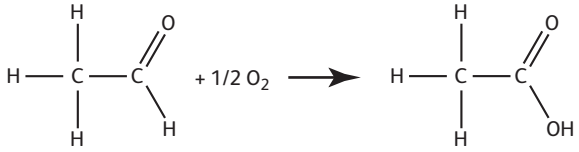
ANALYSER

2. a.

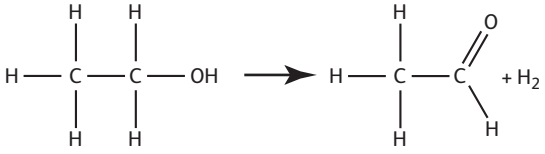
Transformation ⓐ



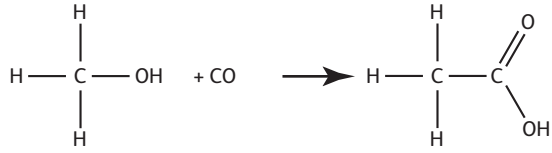
Transformation ⓑ



Transformation ⓒ



Transformation ⓓ



b.

Transformation ⓐ	La chaîne carbonée a été modifiée. Le groupe caractéristique hydroxyle a été ajouté.
Transformation ⓑ	Le groupe caractéristique carbonyle a été modifié.
Transformation ⓒ	Le groupe caractéristique hydroxyle a été modifié.
Transformation ⓓ	Le groupe caractéristique hydroxyle a été modifié et la chaîne carbonée a été allongée.

c. À ce stade les définitions des trois catégories de réaction n'ont pas été données aux élèves. Néanmoins les noms sont évocateurs et les élèves doivent pouvoir attribuer des noms aux transformations étudiées.

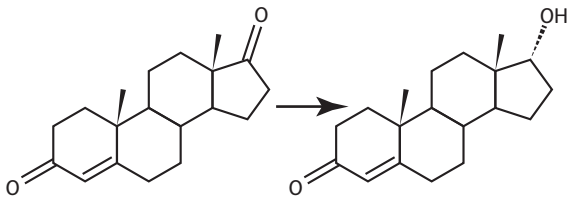
Transformation ⓐ : tous les atomes de la molécule d'eau se retrouvent dans l'éthanol ; il s'agit d'une addition.

Transformation ⓑ : l'atome d'oxygène est ajouté aux atomes de l'éthanal ; il s'agit d'une addition.

Transformation ⓒ : deux atomes du réactif (atomes d'hydrogène) ont été éliminés ; il s'agit d'une élimination.

Transformation ⓓ : deux atomes ont été ajoutés sur la molécule de réactif ; il s'agit d'une addition.

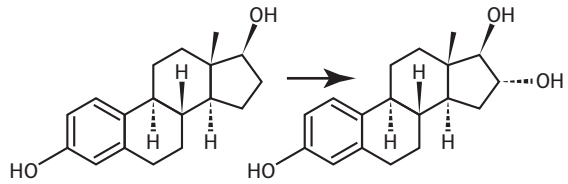
d.



androstènedione testostérone

Le groupe carbonyle est transformé en groupe hydroxyle ; la chaîne carbonée possède un groupe méthyle supplémentaire : il y a modification de groupe et de chaîne.

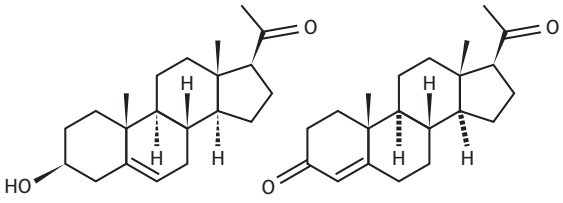
Il y a des atomes supplémentaires (un atome de carbone et 4 atomes d'hydrogène) : il s'agit d'une addition.



estradiol estriol

Il y a un nouveau groupe caractéristique ; la chaîne carbonée n'est pas modifiée : modification de groupe.

Il y a des atomes supplémentaires (un atome d'oxygène) : il s'agit d'une addition.



prégnénolone progestérone

Le groupe hydroxyle est transformé en groupe carbonyle ; la double liaison C=C est déplacée : modification de groupe et de chaîne.
Il y a deux atomes d'hydrogène en moins : il s'agit d'une élimination.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Les réactifs de Grignard

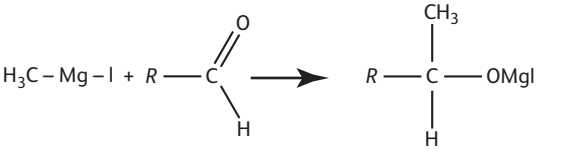
Commentaires

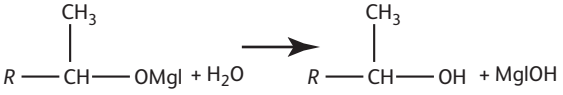
Cette activité permet aux élèves de se familiariser avec la synthèse de documents.
Les questions de la partie « Analyser » doivent les aider à extraire les principales informations du texte.
Par ailleurs, elle permet de revoir la notion d'électronégativité abordée en 1re S, et de faire émerger son rôle dans la formation de nouvelles liaisons.

Réponses

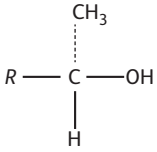
ANALYSER

1. a. $H_3C - I + Mg \rightarrow H_3C - Mg - I$





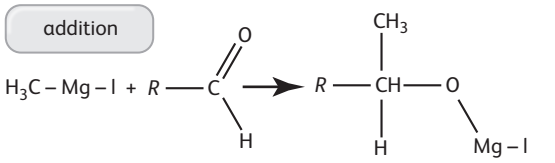
b. La liaison formée est représentée ci-contre en pointillés.

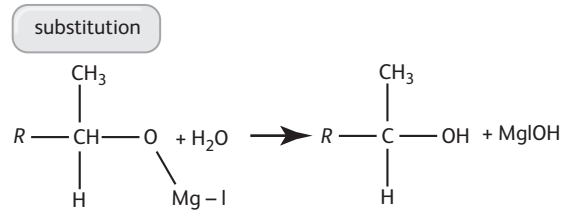


ANALYSER

2. a.







b. L'électronégativité de O est plus grande que celle de C, la liaison C=O est donc polarisée et C porte la charge partielle positive.
L'électronégativité de Mg est plus petite que celle de C, la liaison C–Mg est donc polarisée et C porte la charge partielle négative.
L'électronégativité de I est supérieure à celle de C, la liaison C–I est donc polarisée et C porte la charge partielle positive.
c. L'atome qui porte une charge partielle négative possède un excès d'électrons, il peut donner un doublet d'électrons ; il s'agit de l'atome de carbone de la liaison C–Mg.
d. L'atome de carbone de CH_3I et celui du groupe carbonyle de *R*CHO possèdent tous les deux une charge partielle positive, aucun d'eux ne peut jouer le rôle de « donneur ».
e. Les réactifs de Grignard possèdent un atome de magnésium ; dans le document 3, il s'agit de CH_3MgI.
f. Lors de la transformation du document 3, deux liaisons C–C sont créées.
g. Par analogie avec ce qui précède, l'atome de carbone du réactif de Grignard joue le rôle de donneur de doublet d'électrons. L'autre atome de carbone avec lequel se créent les nouvelles liaisons C–C, qui est l'atome de carbone du groupe carboxyle est donc l'atome accepteur de doublet d'électrons.

COMMUNIQUER

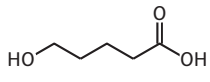
3. Les atomes les plus fréquents liés à C dans les espèces organiques sont H, O, N ou des atomes d'halogènes. Excepté H, tous les autres atomes ont une électronégativité supérieure à celle de C : dans la plupart des espèces organiques l'atome de carbone est un accepteur de doublets d'électrons. L'utilisation de Mg permet « d'inverser » la polarité de l'atome de carbone et en fait un donneur de doublet d'électrons. On parle d'**umpolung** (du terme allemand signifiant inversion).

EXERCICES Appliquer le cours

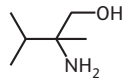
Espèces chimiques polyfonctionnelles (§1 du cours)

13. Utiliser le nom d'une molécule organique

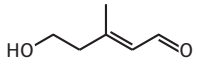
a.



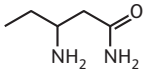
b.



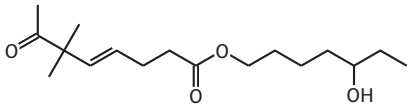
c.



d.



e.



Transformations en chimie organique (§2 du cours)

14. Identifier des modifications de chaine ou de groupe

A → *B* : chaîne et groupe
A → *C* : groupe
A → *D* : chaîne
A → *E* : groupe
A → *F* : chaîne et groupe
A → *G* : chaîne

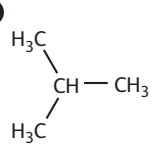
15. Déterminer la catégorie d'une réaction

a. Addition : le produit contient tous les atomes de tous les réactifs.
b. Substitution : l'atome d'iode est remplacé par le groupe d'atomes $NH_3^{\oplus}$.
c. Élimination : deux groupes d'atomes, H et OH sont détachés du réactif et il y a formation d'une double liaison.

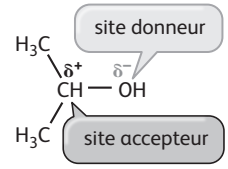
Vers une interprétation des transformations chimiques (§3 du cours)

16. Déterminer la polarisation des liaisons

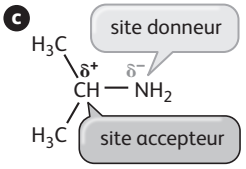
a



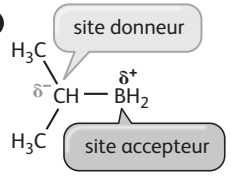
b



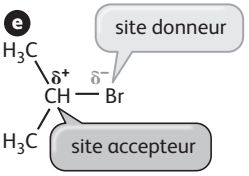
c



d

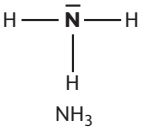


e

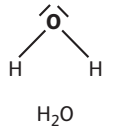


17. Identifier un site donneur ou accepteur

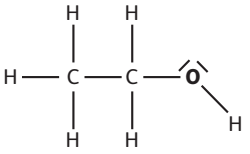
a. L'atome donneur de doublet d'électrons est représenté en gras ci-dessous :



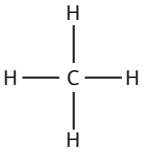
NH_3



H_2O

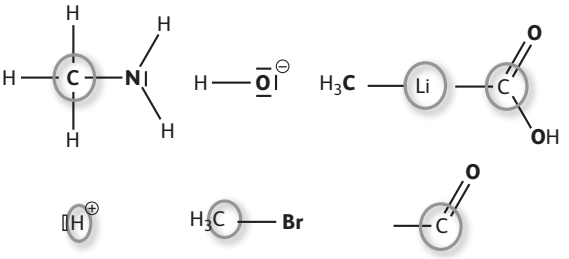


CH_3CH_2OH



CH_4

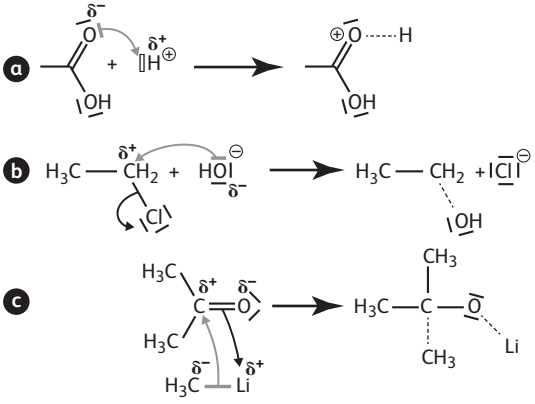
b



entourés : atomes accepteurs
en gras : atomes donneurs

18. Modéliser par des flèches courbes

a. Les liaisons formées sont représentées ci-dessous en pointillés.
b. Les sites donneurs sont identifiés par δ-.
c. Les sites accepteurs par δ+.
d.



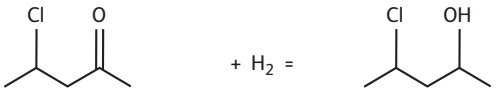
EXERCICES S'entraîner

19. Exercice résolu dans le manuel

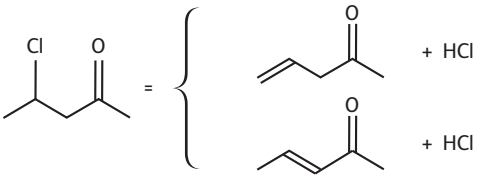
20. Application de l'exercice résolu

1. La 4-chloropentan-2-***one*** appartient à la classe fonctionnelle des ***cétones***.

2. On peut additionner les atomes d'hydrogène sur la double liaison C=O :



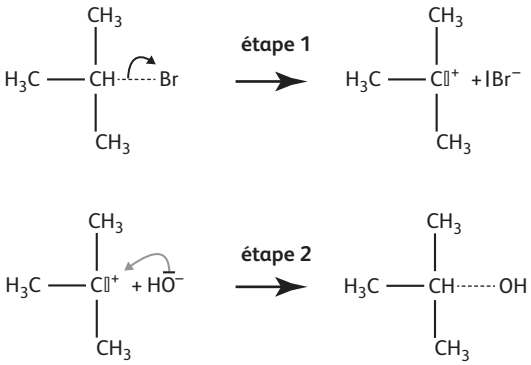
3.



21. Exercice résolu dans le manuel

22. Application de l'exercice résolu

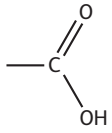
Ci-dessous en pointillés sur l'étape 1 la liaison rompue C – Br et en pointillés sur l'étape 2 la liaison C – O créée.



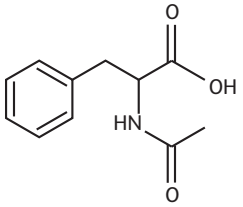
23. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, communiquer.**

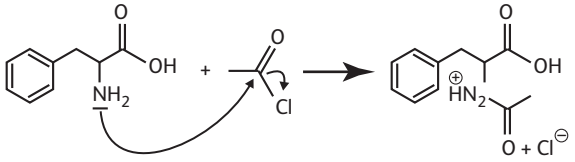
a. La phénylalanine possède les groupes caractéristiques amino $-NH_2$ et carboxyle.



b. L'amide obtenu est :



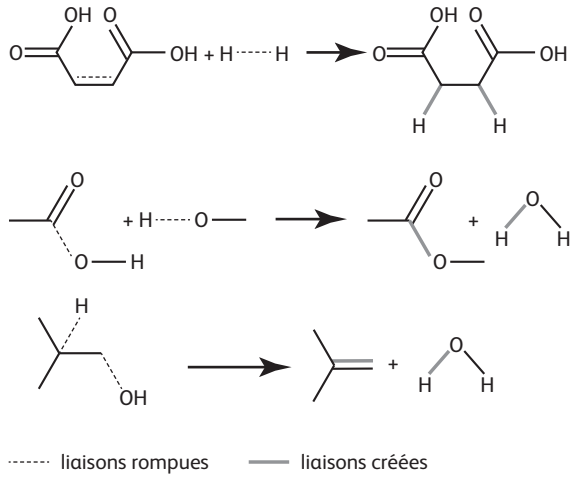
c.



$\chi(N) > \chi(C)$: la chaîne C–N est donc polarisé et N porte la charge potentielle négative : il peut jouer le rôle de donneur.

24. Identifier les liaisons rompues ou créées

> COMPÉTENCES : **Analyser.**

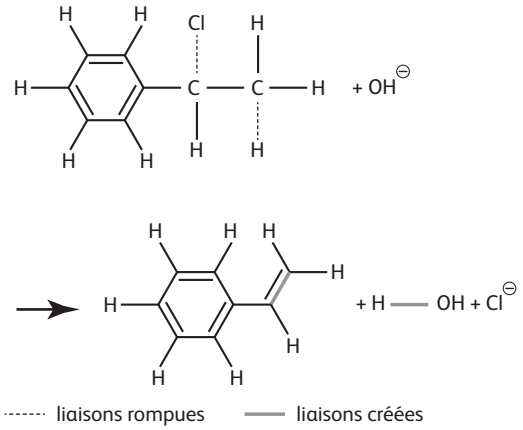


25. Les représentations de molécules

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser.**

a. Lors de cette réaction les liaisons simples C – H et C – Cl sont rompues ; une liaison simple C – C se transforme en liaison double C=C : il s'agit d'une élimination.

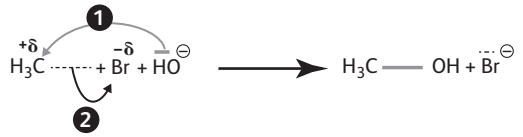
b.



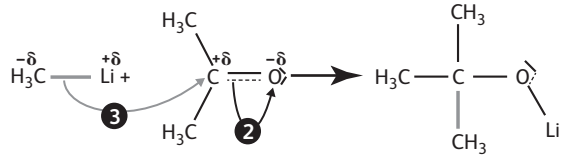
26. In English Please

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. $\chi(Br) > \chi(C)$

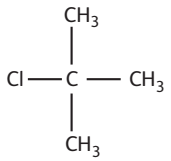


b.

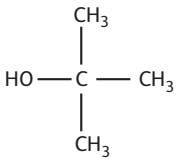


27. ★ S'auto-évaluer

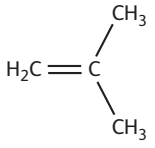
a.



2-chloro-2-methylpropane



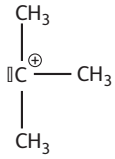
2-methylpropan-2-ol



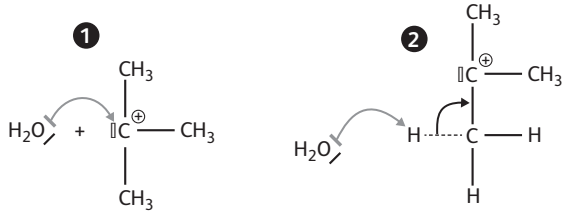
2-methylprop-1-ène

b. Dans les deux cas, c'est la liaison $C^{+\delta}-Cl^{-\delta}$ qui est rompue.

c.



d.



28. Déterminer la catégorie d'une réaction

> COMPÉTENCES : **Analyser, connaître.**

a. Substitution : atome H du noyau aromatique remplacé par $H_3C-C=O$.

b. Élimination : le réactif de départ, seul, conduit à deux produits contenant tous ses atomes.

c. Substitution : un atome H de l'azote est substitué par $H_3C-C=O$.

d. Élimination : le réactif de départ, seul, conduit à deux produits contenant tous ses atomes.

29. ★ Exploiter des documents

> COMPÉTENCES : **Analyser, communiquer.**

a. L'espèce présente la bande IR caractéristique des liaisons O–H ; cette hypothèse est confirmée par le pic à 5,2 ppm du spectre de RMN. D'autre part à 4 ppm, le signal qui intègre pour 1H est un 7-uplet, on propose :



b. et c. $CH_3–CHBr–CH_3 + HO^- \rightarrow CH_3–CH(OH)–CH_3 + Br^-$: il s'agit d'une substitution.

$CH_3–CHBr–CH_3 + HO^- \rightarrow CH_3–CH=CH_2 + Br^- + H_2O$: il s'agit d'une élimination.

d.

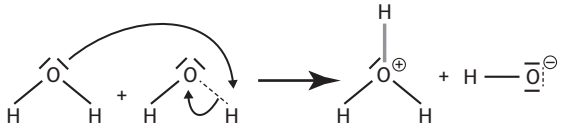


30. ★ Une réaction en chimie inorganique

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. c. et d.

Liaison rompue en pointillés et liaison créée en gras :

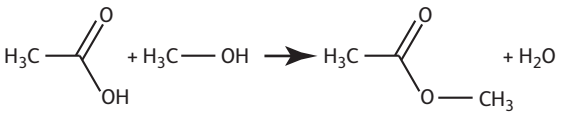


b. $\chi(H) < \chi(O)$ donc H possède une charge partielle δ^+ et O une charge partielle δ^-.

31. ★ Interpréter des résultats expérimentaux

> COMPÉTENCES : **Analyser, s'approprier, connaître, réaliser.**

a.

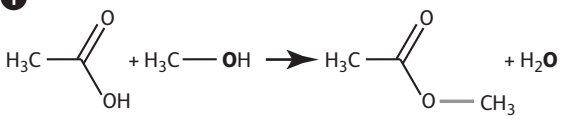


Il se forme une molécule d'eau.

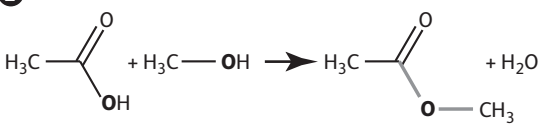
b. Les deux liaisons susceptibles d'avoir été formées sont les deux liaisons C–O simples.

c.

❶



❷



d. Le marquage isotopique indique que l'atome d'oxygène du méthanol se retrouve dans l'ester ; c'est donc l'hypothèse 2 ci-dessus qui est en accord avec les résultats expérimentaux.

O marqué est noté en gras.

32. ★ Comparaison de deux substitutions

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

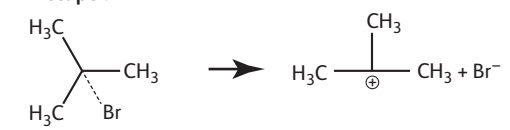
a. Carbone, noir ; hydrogène, rouge ; oxygène, bleu et brome violet.

b. Animation 1 : les réactifs sont $(CH_3)_3C–Br$ et CH_3OH.

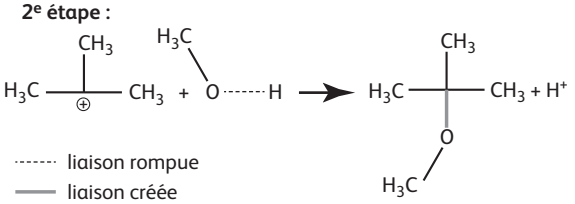
Animation 2 : $CH_3–Br$ et CH_3O^-.

c. 1re modélisation :

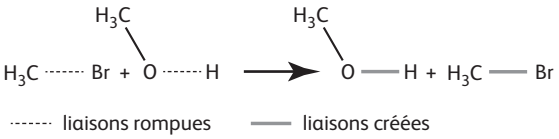
1re étape :



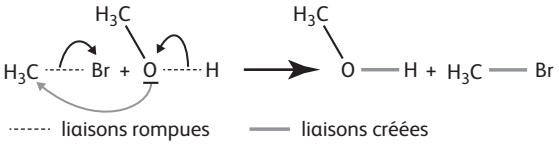
2e étape :



2e modélisation :



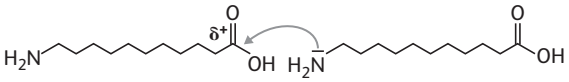
d.



33. ★★ Le Rilsan®

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, réaliser.**

a. et e.

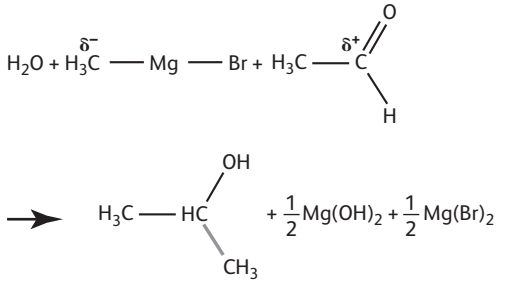


b. L'acide 11-aminoundécanoïque possède un groupe amino et un groupe carboxyle.
c. L'atome d'azote est un atome donneur de doublet d'électrons.
d. L'atome de carbone du groupe carboxyle est un accepteur de doublet d'électrons.
e. Il se forme un groupe amide.
f. $2 \times C_{11}H_{23}O_2N = C_{22}H_{44}N_2O_3 + H_2O$
g. De l'eau se forme conjointement au rilsan.
h. Le rilsan appartient à la famille des polyamides.

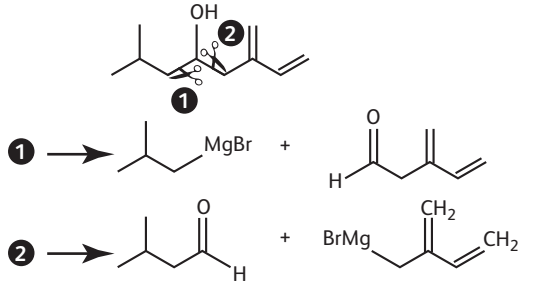
34. ★★ La rétrosynthèse

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. La liaison formée est représentée en violet ci-dessous :
b.



c. Il existe deux possibilités pour obtenir le produit attendu :



EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

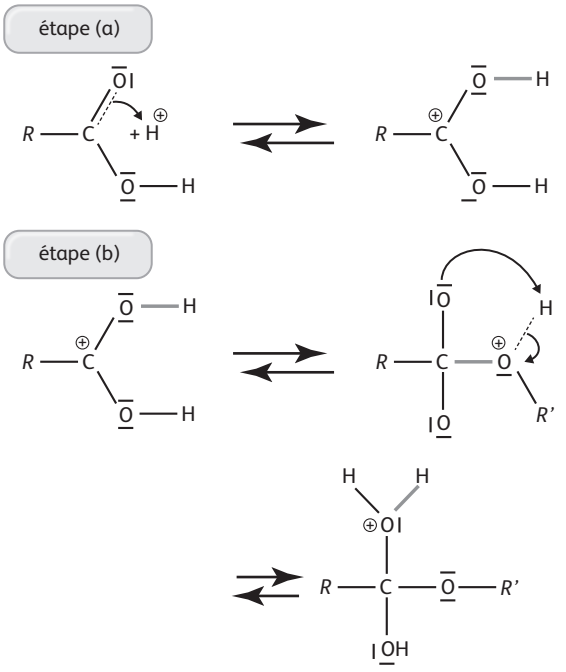
35. D'UNE ODEUR ÂCRE À UNE ODEUR FRUITÉE

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

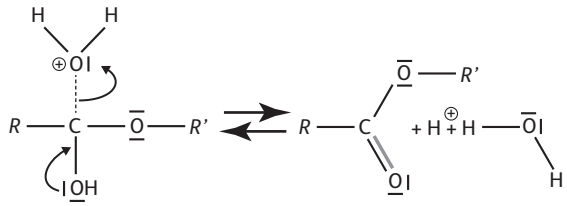
1. L'acide formique est l'acide méthanoïque (la chaîne carbonée possède un seul atome de carbone).
2. Groupe 1 : groupe carboxyle, classe fonctionnelle des acides carboxyliques.
Groupe 2 : groupe hydroxyle, classe fonctionnelle des alcools.
Groupe 3 : groupe ester, classe fonctionnelle des esters.



3. Il s'agit d'une réaction de substitution : l'atome d'hydrogène du groupe carboxyle est remplacé par un groupe $CH_2CH_3CH_3CH_3$.
4. Voir ci-dessous : les liaisons rompues sont représentées en pointillés ; les liaisons créées sont représentées en gras. Il y a également une liaison O-H rompue sur le réactif de départ de l'étape (c).
5.



étape (c)



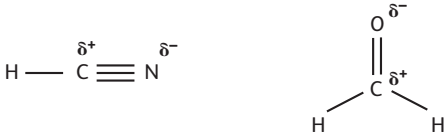
liaisons rompues — liaisons créées

36. ANALYSE DE DOCUMENTS

La chimie prébiotique

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

1. L'électronégativité de l'atome de carbone est inférieure à celles de l'oxygène et de l'azote d'où la polarité suivante :

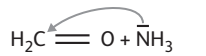


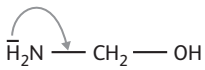
On considère que les atomes d'hydrogène H et de carbone C ont des polarités voisines donc la liaison C–H n'est pas polarisé.

2. $\mathbf{N}H_3 + HCHO + HCN \rightarrow H_2\mathbf{N} - CH_2 - CN + H_2O$

3.

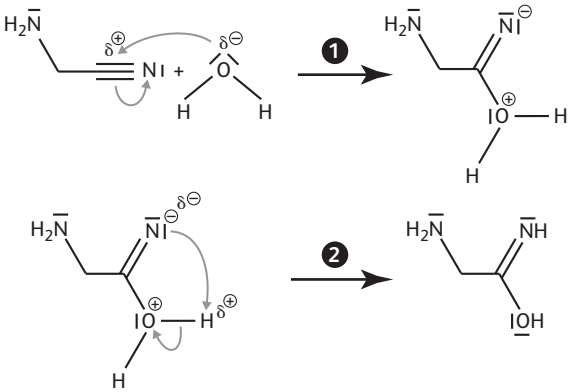
	a	c
Catégorie	addition	élimination
Site donneur	doublet non liant de N	doublet non liant de N
Site accepteur	atome de carbone	liaison simple C–N





4. $H_2N–CH_2–CN + 2\ H_2O \rightarrow NH_3 + H_2N–CH_2–COOH$

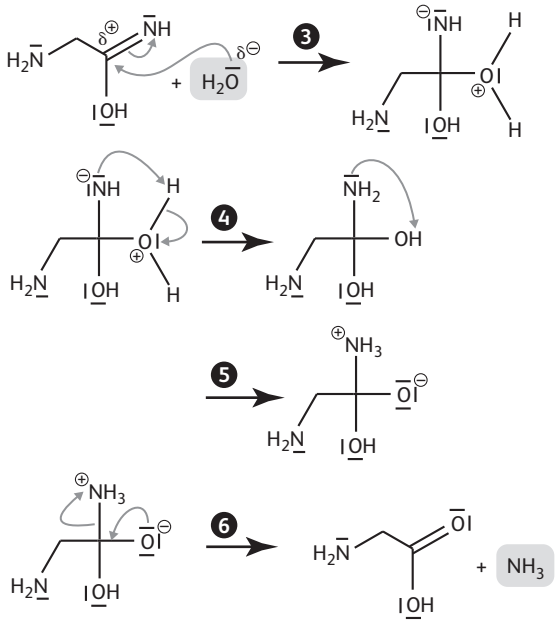
5.



Sites donneurs $\delta^{\ominus}$; accepteurs $\delta^{\oplus}$.

La succession de ces deux étapes correspond à une réaction d'addition de H_2O sur la molécule de départ.

6.



37. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Pourquoi faut-il éviter l'eau ?

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

Dans le document 1, on lit qu'il faut utiliser des réactifs anhydres et de la verrerie sèche : cela signifie que la réaction doit se faire hors présence d'eau.

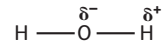
Cette hypothèse est confirmée par la présence d'un garde à chlorure de calcium, qui évite l'humidité de l'air.

Le document 3 concerne l'électronégativité : on a donc l'idée de s'intéresser à l'électronégativité des éléments de l'eau et d'un organomagnésien R–MgBr.

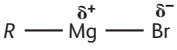
$\chi(O) > \chi(H)$

$\chi(Br) > \chi(Mg) > \chi(C)$

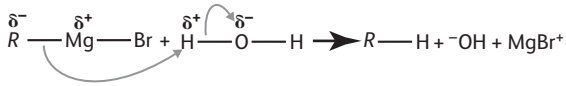
Ainsi la liaison O–H de l'eau est polarisée :



Par ailleurs la polarité de l'organomagnésien est indiquée dans le document 4 :



Par analogie avec le document 4, on peut envisager la réaction suivante entre l'organomagnésien et l'eau :



On peut donc faire l'hypothèse que l'eau et l'organomagnésien réagissent ensemble pour former un alcane.

Donc en présence d'eau, l'organomagnésien est consommé par cette réaction.

38. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Transformation chimique de molécules odorantes

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

CHAPITRE

15

COMPRENDRE

Théorie de Brönsted. Notion d'équilibre chimique

> Manuel pages 334 à 359

Choix pédagogiques

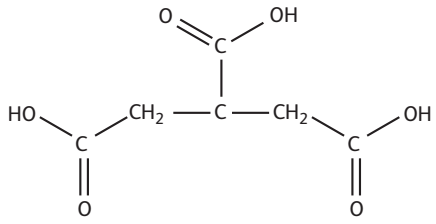
Les compétences et connaissances relatives à la partie « Réaction chimique par échange de protons » du programme de T^{term} S sont réparties dans les chapitres 15 et 16. Le chapitre 15 commence par l'évocation des solutions acido-basiques, la notion de pH ainsi que les méthodes de mesure de pH. Le produit ionique de l'eau est défini comme une constante, dépendant de la température, reliant les concentrations en ion H_3O^+ et HO^-. Les notions de couple acide/base au sens de Brönsted-Lowry et de réactions acido-basiques sont ensuite introduites. L'étude expérimentale de ces réactions montre que leur avancement final n'est pas toujours égal à leur avancement maximal et permet ainsi de classer les réactions en deux catégories : les réactions quasi-totales et les réactions équilibrées. Les acides et les bases sont alors classés en deux familles en fonction de la catégorie à laquelle appartient leur réaction avec l'eau. Les acides et bases fortes réagissent de façon quasi-totale avec l'eau quelles que soient leurs concentrations, alors que les réactions des acides et des bases faibles avec l'eau sont équilibrées. Le chapitre s'achève avec le calcul du pH de solutions d'acide et de base fortes.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Jus de citron.

Quelles espèces chimiques présentes dans le jus de citron peuvent être responsables de son goût acide ?

La discussion doit permettre de revenir sur la définition du terme « acide », utilisé dans la question dans son sens gustatif courant, mais que les élèves ont déjà rencontré en physique-chimie. Il s'agit de conduire au rappel de la définition de ce terme d'un point de vue chimique : solution de pH < 7 et $[H^+] > [HO^-]$.
Le pH du jus de citron est proche de 2,5.
On peut alors demander aux élèves de réfléchir à l'origine de la présence d'un excès d'ions H^+ dans le jus de citron. La présence d'acide citrique peut être évoquée et sa formule semi-développée ci-dessous donnée.



Les élèves repèrent alors la présence de plusieurs groupes carboxyles et la fonction « acide carboxylique » peut être nommée.
L'interrogation peut se prolonger en questionnant les élèves sur le nom donné à cette fonction. On peut alors évoquer la polarité de liaison O–H et la possibilité de rupture du groupe carboxyle en $-CO_2^-$ et H^+, ce qui permet de faire émerger la définition d'un acide au sens de Brönsted.
Pour information, la composition du jus de citron pour 1 L est :

- 14 à 18 g d'acide citrique
- 0,8 à 0,15 g d'acide malique
- 0,7 à 1,1 g de saccharose
- 3,6 à 4 g de glucose, lévulose, etc.
- 2 g de citrate de calcium
- 1 g de citrate de sodium
- 0,4 g de protides
- 0,4 g de lipides
- 40 à 50 mg de vitamine C (acide ascorbique)
- provitamine A, vitamines A, B1, B2 et B3 ou P, P

ACTIVITÉS

1. DÉMARCHE D'INVESTIGATION

Contrôler et ajuster le pH d'un aquarium

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

Histoire des notions d'acide et de base

Commentaires

Cette activité retrace l'histoire de la construction des définitions d'acide et de base, en parallèle avec l'évolution de la compréhension de la structure de la matière.

Elle peut être l'objet d'un débat en classe. Toutefois, une recherche documentaire permettra de répondre avec plus de précision à la dernière question.

Réponses

ANALYSER

1. La définition de Boyle repose sur des différences de comportement entre acides et bases que l'on peut observer à partir d'expériences simples et concrètes : caractéristiques organoleptiques, effets sur la teinture de tournesol.
Les définitions d'Arrhénius et de Brönsted et Lowry sous-tendent l'écriture d'une équation de réaction et nécessitent la connaissance de la formule chimique des espèces.
Les définitions des acides d'Arrhénius et de Brönsted et Lowry sont identiques. Pour Arrhénius, une base fournit un ion HO^-, pour Brönsed et Lowry, elle capte un ion H^+. Ce n'est pas équivalent.

RÉALISER

2. HA est un acide susceptible de céder un ion H^+ :
$HA \rightarrow A^- + H^+$
A^- est une base susceptible de capter un ion H^+ :
$A^- + H^+ \rightarrow HA$

S'APPROPRIER

3. a. Les deux équations précédentes montrent que lorsque la base A^- capte un ion H^+, elle forme l'acide HA. On peut donc associer les espèces HA/A^- en un couple (on peut faire l'analogie avec un couple oxydant/réducteur qui capte ou cède des électrons).
b. Cette notion n'est plus valable avec la définition de Lewis parce qu'il n'y pas d'échange de particules entre un acide de Lewis et une base de Lewis.

COMMUNIQUER

4. La définition de Boyle s'appuie sur des faits expérimentaux, elle ne repose pas sur la connaissance de la structure atomique des espèces chimiques. Entre Boyle (1627-1691) et le XIX^e siècle, les travaux de Lavoisier (1743-1794) ont mis en évidence l'existence d'éléments chimiques, ceux de Faraday (1791-1867) ont ensuite permis la découverte d'espèces chargées. Ces notions étaient nécessaires à l'élaboration des définitions d'Arrhénius et de Brönsted. Enfin, celle de Lewis nécessite une connaissance de la structure électronique de l'atome dont les modèles datent du début du XX^e siècle.

3. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Notion d'équilibre acido-basique

Commentaires

L'activité a pour objet l'étude de la réaction d'un acide (au sens de Brönsted) avec l'eau. Elle exploite une mesure de pH et permet d'aborder l'utilisation du pH-mètre.
Deux acides faibles (acide éthanoïque et ion ammonium) et un acide fort (l'acide nitrique) sont utilisés. L'analyse de l'équation de la réaction donnée dans le document 2 permet de montrer qu'un ion H^+ est cédé par l'acide HA et reçu par l'eau. L'acide joue ainsi le rôle d'acide de Brönsted et l'eau celui de base de Brönsted.
Deux acides faibles, l'un neutre, l'autre cationique, sont utilisés, ce qui permet de discuter de la notation générique HA pour un acide et A^- pour une base (HB^+/B est plus adéquate pour le couple NH_4^+/NH_3). L'utilisation de l'acide nitrique plutôt que de l'acide chlorhydrique permet de s'affranchir d'une discussion plus complexe introduisant les espèces HCl (g) et HCl (aq).
La mesure du pH de la solution permet de déterminer la concentration molaire en ions H_3O^+ et d'en déduire l'avancement volumique puis l'avancement de la réaction. La relation entre pH et $[H_3O^+]$ est explicitée ; toutefois l'utilisation de la fonction 10^x des calculatrices peut être indiquée par le professeur qui pourra également mettre en évidence la différence entre 10^x et la fonction EE ne s'appliquant, elle, qu'aux puissances entières relatives de 10.
Bien que le pH-mètre affiche en général le résultat de la mesure avec deux chiffres après la virgule, il est raisonnable, au vu de la précision effective de ces appareils dans le cadre de leur utilisation par des élèves de lycée, de n'en conserver qu'un seul. Une discussion sur la précision des mesures peut être proposée lors de la validation des résultats (question 3).
Les résultats des mesures montrent que la réaction étudiée n'est pas toujours totale ; elle permet d'aborder la différence éventuelle entre avancement maximal et avancement final. L'élève est amené par un questionnement à remettre en cause le caractère total d'une réaction, qu'il utilisait sans le nommer en construisant son tableau d'avancement.
Le symbolisme utilisé pour l'écriture des réactions totales ou non totales est introduit et permet de corriger la notation générique utilisée dans le document 2.

Réponses

RÉALISER

1. a. et b.
Exemples de résultats de mesures :

Solution	pH	$[H_3O^+]$ /mol·L^{-1} = 10^{-pH}
Acide nitrique	4,0	$1{,}0 \times 10^{-4}$
Acide éthanoïque	4,4	$4{,}0 \times 10^{-5}$
Chlorure d'ammonium	6,1	$7{,}9 \times 10^{-7}$

ANALYSER

2. a. $HNO_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow NO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$
$CH_3CO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow CH_3CO_2^-(aq) + H_3O^+(aq)$
$NH_4^+(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow NH_3\,(aq) + H_3O^+(aq)$

b. En notant V le volume de la solution :

		$HA\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow A^-(aq) + H_3O^+(aq)$			
État	**Avancement**	**Quantités de matière**			
initial	0	cV	excès	0	0
final	x	$cV - x$		x	x

c. L'avancement maximal de la réaction est obtenu pour $cV - x_{max} = 0$ donc $x_{max} = cV$.

La quantité d'ions H_3O^+ attendue en fin de réaction est égale à x_{max}, sa concentration est donc $\frac{x_{max}}{V} = c$.

On attend une valeur de $1{,}0 \times 10^{-4}$ mol·L^{-1}.

VALIDER

3. a. La valeur attendue est bien celle obtenue pour l'acide nitrique mais pas pour les deux autres acides. L'incertitude sur la mesure de pH est de 0,1, la différence entre les valeurs 4,4 et 6,1 et la valeur attendue de 4,0 est supérieure à 0,1 et ne peut donc être imputée aux incertitudes de mesure.

b. On a supposé que l'avancement final était égal à l'avancement maximal, ce qui ne semble pas toujours être le cas.

ANALYSER

4. Le terme « réaction totale » signifie que la totalité de l'acide introduit a été consommée, c'est-à-dire que l'avancement final est égal à l'avancement maximal. C'est le cas de la réaction de l'acide nitrique avec l'eau, mais pas de l'acide éthanoïque ni de l'ion ammonium pour lesquels la réaction avec l'eau est non totale.

$HNO_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow NO_3^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

$CH_3CO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons CH_3CO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

$NH_4^+\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons NH_3\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

4. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Étude d'une réaction exothermique

Commentaires

Cette activité répond à la compétence du programme « *mettre en évidence l'influence des quantités de matière mises en jeu sur l'élévation de température observée au cours de la réaction entre un acide fort et une base forte* ». Elle s'accompagne d'une discussion sur la lecture des pictogrammes de sécurité. Les expériences permettent de montrer que les quantités de matière, mais également le volume des solutions utilisées, ont des conséquences sur la valeur de la variation de température.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Les pictogrammes montrent que les solutions sont corrosives. L'utilisation de gants est donc recommandée.

RÉALISER

2. a. b.

Exemples de résultats de mesures :

Expérience	θ_0 (°C)	θ_f (°C)	$\theta_f - \theta_0$ (°C)
1	20,0	25,8	5,8
2	20,0	20,5	0,5
3	20,0	26,0	6,0
4	20,0	22,8	2,8

ANALYSER

3. a. $H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$

b. L'avancement final est égal à l'avancement maximal (réaction quasi-totale).

• **Tableau générique**

		$H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$		
État	**Avancement**	**Quantités de matière**		
initial	0	cV_1	cV_2	excès
en cours	x	$cV_1 - x$	$cV_2 - x$	excès
final	x_{max}	$cV_1 - x_{max}$	$cV_2 - x_{max}$	excès

• **Expérience 1**

		$H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$		
État	**Avancement**	**Quantités de matière**		
initial	0	0,10	0,10	excès
final	$x_{max} = 0{,}10$ mol	≈ 0	≈ 0	excès

• **Expérience 2**

		$H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$		
État	**Avancement**	**Quantités de matière**		
initial	0	0,010	0,010	excès
final	$x_{max} = 0{,}010$ mol	≈ 0	≈ 0	excès

• **Expérience 3**

		$H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$		
État	**Avancement**	**Quantités de matière**		
initial	0	0,20	0,20	excès
final	$x_{max} = 0{,}20$ mol	≈ 0	≈ 0	excès

• **Expérience 4**

		$H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$		
État	**Avancement**	**Quantités de matière**		
initial	0	0,15	0,050	excès
final	$x_{max} = 0{,}050$ mol	0,10	≈ 0	excès

c. La réaction conduit à une élévation de température du milieu réactionnel. Sa réalisation s'est donc accompagnée d'un transfert thermique, d'où le terme exothermique (« exo » signifie « vers l'extérieur », c'est-à-dire ici vers la solution aqueuse).

VALIDER

4. Pour un même volume total de solution (expériences 1, 2 et 4), l'élévation de température semble d'autant plus importante que l'avancement maximal est grand (5,8 °C pour 0,10 mol, 0,5 °C pour 0,010 mol et 2,8 °C pour 0,050 mol). Cet avancement maximal est égal à la quantité de réactif limitant. Dans l'expérience 3, les quantités introduites et donc l'avancement maximal sont plus grandes que pour les autres expériences mais le volume est également plus grand. L'élévation de température est voisine de celle de l'expérience 1, pour laquelle les quantités initiales sont inférieures mais les concentrations initiales identiques. Il semble donc que l'élévation de température soit d'autant plus grande que les concentrations initiales sont grandes.

Il est possible de prolonger l'activité :
• en visitant le site de l'INRS : http://www.inrs.fr/accueil/risques/chimiques/classification–produits/nouvelle–classification.html et en évoquant les phrases H et P ;
• en évoquant le fait que les réactions entre un acide fort et l'eau sont également exothermiques, d'où la nécessité d'ajouter l'acide fort dans l'eau et non pas l'eau dans un acide fort.

EXERCICES Appliquer le cours

Solution acido-basique (§1 du cours)

16. Exploiter des mesures de pH

Solution	jus d'orange	eau de mer	lait	café
pH	4	8,0	6,5	5,0
$[H_3O^+]$ / mol·L^{-1}	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-5}$
$[HO^-]$ / mol·L^{-1}	$1,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-9}$

17. Calculer un pH
a. $[H_3O^+] = 1,0 \times 10^{-4}$ mol·L^{-1}, pH = 4,0, la solution est acide.
b. Il faut que la concentration en ions hydroxyde soit supérieure à c, donc que la concentration en ions H_3O^+ soit inférieure à la solution calculée à la question **a.** ou que le pH soit supérieur à la valeur calculée en **a.**

Couples acide-base dans la théorie de Brönsted (§2 du cours)

18. Écrire des couples acide-base

Acide	ClOH	HCO_3^-	H_3PO_4	H_3O^+	H_2S	HS^-
Base	ClO^-	CO_3^{2-}	$H_2PO_4^-$	H_2O	HS^-	S^{2-}

Réaction acido-basique (§3 du cours)

19. Reconnaître des couples acide-base
a. Une réaction acido-basique est une réaction au cours de laquelle la base d'un couple capte un ion H^+ cédé par l'acide d'un autre couple.
b. 1re réaction : couples HCO_2H/HCO_2^- et H_2O/HO^-.
2e réaction : couples H_2S/HS^- et H_3O^+/H_2O.

20. Utiliser les symbolismes → et ⇌
La base B et l'acide HA sont introduits en même quantité (10,0 mmol). L'avancement maximal de la réaction acido-basique $B + HA \rightarrow BH^+ + A^-$ est donc de 10,0 mmol. Si l'avancement final est quasiment égal à 10,0 mmol, la réaction est totale, dans le cas contraire, elle est équilibrée :
$HNO_2\,(aq) + HCO_2^-\,(aq) \rightleftharpoons NO_2^-\,(aq) + HCO_2H\,(aq)$
$CH_3NH_2\,(aq) + H_3O^+\,(aq) \rightarrow CH_3NH_3^+\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
$H_2S\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow HS^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
$CH_3CO_2^-\,(aq) + NH_4^+\,(aq) \rightleftharpoons CH_3CO_2H\,(aq) + NH_3\,(aq)$

Deux familles d'acide ; deux familles de base (§4 du cours)

21. Écrire une équation de réaction acido-basique
Un acide ou une base forte réagissent de façon quasi-totale avec l'eau (symbole →). Un acide et une base faible réagissent de façon équilibrée avec l'eau (symbole ⇌).
a. $CH_3NH_2\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons CH_3NH_3^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$
b. $HSO_3^-\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons SO_3^{2-}\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$
c. $HSO_3^-\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons H_2SO_3\,(aq) + HO^-\,(aq)$
(HSO_3^- est donc l'acide d'un couple et la base d'un autre, c'est un ampholyte.)
d. $CH_3NH^-\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow CH_3NH_2\,(aq) + HO^-\,(aq)$

22. Calculer le pH d'une solution d'acide fort
a. $HCl\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow Cl^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$
b. On a préparé une solution d'acide fort de concentration initale $c = \dfrac{n}{V}$ avec $n = 5,2 \times 10^{-4}$ mol·L^{-1} et $V = 0,200$ L.
Le pH de la solution est pH = –log c.
A. N. : pH = 2,6.

23. Calculer le pH d'une solution de base forte
a. La réaction de dissolution de l'hydroxyde de sodium dans l'eau est :
$NaOH\,(s) \rightarrow Na^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$.
b. La solution est réalisée en introduisant une quantité d'hydroxyde de sodium de $\dfrac{0,5}{23 + 16 + 1} = 1,25 \times 10^{-2}$ mol dans 1,00 L d'eau. La concentration initiale en ions HO^- est donc :
$c = 1,25 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1} et pH = 14 + log c = 12,1.
c. Lorsque la solution est diluée 10 fois, la concentration en ions HO^- est divisée par 10, la concentration en ions H_3O^+ est donc multipliée par 10 car $[HO^-] \times [H_3O^+] = K_e$, le pH diminue d'une unité, d'où pH = 11,1.

24. Réaliser des calculs approchés
a. Solution d'acide fort : pH = –log c avec $c \approx 10^{-3}$ mol·L^{-1} donc pH ≈ 3. La valeur proposée la plus proche est pH = 2,6.
b. Concentration des ions hydroxydes :
$[HO^-] \approx \dfrac{0,4}{40} = 10^{-2}$ mol·L^{-1} donc :
$[H_3O^+] = \dfrac{10^{-14}}{[HO^-]} \approx 10^{-12}$ mol·L^{-1} donc pH ≈ 12.
La valeur proposée la plus proche est pH = 12,0.
c. Concentration des ions hydroxydes :
$[HO^-] \approx 10^{-4}$ mol·L^{-1} donc $[H_3O^+] = \dfrac{10^{-14}}{[HO^-]} \approx 10^{-10}$ mol·L^{-1}
donc pH ≈ 10. La valeur proposée la plus proche est pH = 10,6.
d. Solution d'acide fort : pH = –log c avec :
$c \approx \dfrac{4 \times 10^{-4}}{40} \approx 10^{-5}$ mol·L^{-1} donc pH ≈ 5.
La valeur proposée la plus proche est pH = 5,0.

EXERCICES S'entraîner

25. Exercice résolu dans le manuel

26. Application de l'exercice résolu

1. La concentration initiale de la base, après dilution, est $c' = 7{,}4 \times 10^{-3}$ mol·L^{-1} puisque la solution a été diluée d'un facteur 1 000. S'il s'agit d'une base forte, le pH de la solution est :

$pH = 14 + \log c' = 14 + \log(7{,}4 \times 10^{-3}) = 11{,}8$.

Le pH de la solution est plus faible. L'ammoniac est donc une base faible.

2. La réaction de l'ammoniac avec l'eau est un équilibre chimique puisqu'il s'agit d'une base faible :

$$NH_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons NH_4^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$$

27. Exercice résolu dans le manuel

28. Application de l'exercice résolu

1. Le bromure d'hydrogène est un acide fort, sa réaction avec la base forte HO^- est quasi-totale :

$$HBr\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow Br^-\,(aq) + H_2O\,(\ell).$$

2. HBr est introduit en défaut : c'est le réactif limitant, il est entièrement consommé à la fin de la réaction.

		$HBr(aq) + HO^-(aq) \rightarrow H_2O(\ell) + Br^-(aq)$			
État	**Avancement**	**Quantités de matière**			
initial	0	$n_1 < n_2$	n_2	excès	0
final	$x_{max} = n_1$	0	$n_2 - n_1$	excès	n_1

3. Il reste des ions HO^- en excès dans la solution qui sera donc basique.

4. Lorsqu'on augmente n_1, la quantité d'ions hydroxyde dans l'état final diminue, le pH diminue donc. À l'inverse, le pH augmente lorsqu'on diminue n_1.

29. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, connaître, communiquer.**

a. Une solution de masse m et de masse volumique ρ occupe un volume $V = \dfrac{m}{\rho}$, elle contient une masse $m_{HCl} = \dfrac{25\,m}{100}$ de chlorure d'hydrogène.

Sa concentration massique est : $c_m = \dfrac{m_{HCl}}{V} = \dfrac{m_{HCl}\rho}{m}$.

(**Vérification :** m_{HCl} en g, ρ en g·L^{-1}, m en g d'où c_m en g·L^{-1}.)

Elle contient une quantité n_{HCl} de chlorure d'hydrogène vérifiant $n_{HCl} = \dfrac{m_{HCl}}{M}$. La concentration molaire de la solution est $c = \dfrac{m_{HCl}}{MV} = \dfrac{c_m}{M}$.

(**Vérification :** c_m en g·L^{-1}, M en g·mol^{-1} d'où c en mol·L^{-1}.)

A. N. : $\rho = 1{,}12$ g·cm^{-3} $= 1{,}12 \times 10^3$ g·L^{-1} ;

$$c_m = \frac{25{,}0 \times 1{,}12 \times 10^3}{100} = 280 \text{ g·L}^{-1} ;$$

$$c = \frac{280}{36{,}5} = 7{,}67 \text{ mol·L}^{-1}.$$

b. Verrerie nécessaire : une fiole jaugée de 1,00 L, une pipette jaugée de 10,0 mL.

1. Rincer la pipette jaugée avec la solution mère et la fiole jaugée avec de l'eau distillée.

2. Prélever 10,0 mL de la solution mère à l'aide d'une pipette.

3. Verser le volume de solution prélevée dans la fiole jaugée.

4. Compléter la fiole jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée en agitant régulièrement.

5. Boucher et agiter.

c. Le chlorure d'hydrogène est un acide fort, il réagit de façon quasi-totale avec l'eau :

$$HCl\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow H_3O^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)$$

Le pH d'une solution d'acide fort de concentration initiale c_a s'exprime par $pH = -\log c_a$ avec c_a en mol·L^{-1}.

A. N. : $c_a = \dfrac{c}{100} = 7{,}67 \times 10^{-2}$ mol.L^{-1}

et $pH = -\log(7{,}67 \times 10^{-2}) = 1{,}1$.

30. Acidité du vinaigre

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

a. L'acide éthanoïque est un acide faible. Sa réaction avec l'eau est un équilibre chimique :

$$CH_3CO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons H_3O^+\,(aq) + CH_3CO_2^-\,(aq)$$

b. Voir le tableau d'avancement de la réaction en bas de page.

L'avancement final x_{fin} de la réaction est égal à la quantité d'ions H_3O^+. On connaît le pH de la solution, on peut donc évaluer la concentration en ions H_3O^+ et en déduire leur quantité :

$x_{fin} = [H_3O^+] \times V = 10^{-pH} \times V$.

A. N. : $x = 10^{-2{,}6} \times 1 = 2{,}5 \times 10^{-3}$ mol.

c. D'après le tableau d'avancement : la quantité d'acide éthanoïque est $n - x_{fin}$ où n est la quantité initiale d'acide éthanoïque. On connaît la masse initiale m d'acide éthanoïque donc $n = \dfrac{m}{M}$ et $n_{CH_3CO_2H} = \dfrac{m}{M} - x$.

A. N. : $n_{CH_3CO_2H} = \dfrac{60}{60} - 2{,}5 \times 10^{-3} = 1{,}0$ mol.

De plus : $n_{CH_3CO_2^-} = x_{fin} = 2{,}5 \times 10^{-3}$ mol.

Tableau de la question b. de l'exercice 30 :

		$CH_3CO_2H\,(aq)$ + $H_2O(\ell)$ $\rightleftharpoons$ $H_3O^+(aq)$ + $CH_3CO_2^-(aq)$			
État	**Avancement**	**Quantités de matière**			
initial	0	n	excès	0	0
final	x_{fin}	$n - x_{fin}$	excès	x_{fin}	x_{fin}

31. Solution de base faible

> COMPÉTENCES : **Connaître, réaliser.**

a. La réaction de la base faible NH_3 avec l'acide H_2O est un équilibre chimique :

$$NH_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons NH_4^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$$

b. L'avancement de la réaction équilibrée de l'ammoniac avec l'eau est inférieur à celui de la réaction totale d'une même quantité de base forte avec l'eau. La quantité, et donc la concentration, d'ions HO^- dans la solution d'ammoniac sont donc plus faibles que dans la solution de base forte de même concentration initiale. Or, en solution $[H_3O^+] = \dfrac{K_e}{[HO^-]}$. Donc la concentration d'ions H_3O^+ est plus élevée et le pH plus faible dans la solution d'ammoniac que dans la solution de base forte.

32. pH et digestion

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, réaliser.**

a. Le pH du suc gastrique vaut 1,5, la concentration en ions H_3O^+ y est donc égale à :

$[H_3O^+]_{suc} = 10^{-pH} = 3{,}2 \times 10^{-2}\ mol{\cdot}L^{-1}$.

Dans l'estomac de pH = 3,0, cette concentration est égale à $[H_3O^+]_{estomac} = 10^{-3} = 1{,}0 \times 10^{-3}\ mol{\cdot}L^{-1}$. Le facteur de dilution est $\dfrac{[H_3O^+]_{estomac}}{[H_3O^+]_{suc}}$ donc $\dfrac{1{,}0 \times 10^{-3}}{3{,}2 \times 10^{-2}} = \dfrac{1}{32}$.

La solution est diluée 32 fois.

b. La valeur du pH permet de déterminer :

$[H_3O^+] = 1{,}0 \times 10^{-8}\ mol{\cdot}L^{-1}$ puis celle en ions HO^- :

$[HO^-] = \dfrac{K_e}{[H_3O^+]}$, avec $K_e = 10^{-pKe} = 10^{-13{,}7}$.

A. N. : $[HO^-] = \dfrac{10^{-13{,}7}}{1{,}0 \times 10^{-8}} = 2{,}0 \times 10^{-6}\ mol{\cdot}L^{-1}$.

33. Correction de pH

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

Le produit « pH-moins » est le solide ionique $NaHSO_4$. L'équation de sa dissolution est :

$$NaHSO_4\,(s) \rightarrow Na^+\,(aq) + HSO_4^-\,(aq).$$

L'ion HSO_4^- est un acide qui réagit avec la base H_2O selon la réaction d'équation :

$$HSO_4^-\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons H_3O^+\,(aq) + SO_4^{2-}\,(aq).$$

(L'énoncé ne précise pas qu'il s'agit d'un acide faible, la simple flèche est acceptée.)

La réaction produit des ions H_3O^+. Lorsqu'on ajoute le solide ionique dans l'eau, la concentration en ions H_3O^+ augmente donc et le pH diminue, d'où l'appellation « produit "pH-moins" ».

Le produit « pH–plus » est le solide ionique $CaCO_3$. L'équation de sa dissolution est :

$$CaCO_3\,(s) \rightarrow Ca^{2+}\,(aq) + CO_3^{2-}\,(aq).$$

L'ion CO_3^{2-} est une base qui réagit avec l'acide H_2O selon la réaction d'équation :

$$CO_3^{2-}\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons HCO_3^-\,(aq) + HO^-\,(aq)$$

(L'énoncé ne précise pas qu'il s'agit d'une base faible, la simple flèche est acceptée.)

La réaction produit des ions HO^-. Lorsqu'on ajoute le solide ionique dans l'eau, la concentration en ions HO^- augmente donc. Or, en solution $[H_3O^+] = \dfrac{K_e}{[HO^-]}$ donc la concentration en ions H_3O^+ diminue, entraînant l'augmentation du pH, d'où l'appellation « produit "pH–plus" ».

34. pH sanguin

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, réaliser.**

a. Une solution neutre vérifie : $[H_3O^+] = [HO^-]$.

Or, en solution $K_e = [H_3O^+] \times [HO^-]$.

Donc $K_e = [H_3O^+]^2$, d'où $-\log K_e = pK_e = -2\log[H_3O^+] = 2pH$.

Le pH d'une solution neutre vérifie donc $pH = \dfrac{pK_e}{2}$.

A. N. : $pH = -\log \dfrac{1{,}9 \times 10^{-14}}{2} = 6{,}9$.

b. Le pH du plasma est supérieur à celui d'une solution neutre ($7{,}4 > 6{,}9$) donc le plasma est une solution basique.

c. On calcule les concentrations en ions H_3O^+ correspondant aux deux valeurs extrêmes de pH :

– pour pH = 6,8, $[H_3O^+] = 10^{-6{,}8} = 1{,}6 \times 10^{-7}\ mol{\cdot}L^{-1}$.

– pour pH = 7,8, $[H_3O^+] = 10^{-7{,}8} = 1{,}6 \times 10^{-8}\ mol{\cdot}L^{-1}$.

D'où : $1{,}6 \times 10^{-8}\ mol{\cdot}L^{-1} < [H_3O^+] < 1{,}6 \times 10^{-7}\ mol{\cdot}L^{-1}$.

35. Vitamine C

> COMPÉTENCES : **Analyser, connaître, réaliser.**

a. Dissolution de l'acide ascorbique :

$$C_6H_8O_6\,(s) \rightarrow C_6H_8O_6\,(aq).$$

Il s'agit d'un acide faible qui réagit de façon équilibrée avec la base H_2O selon la réaction d'équation :

$$C_6H_8O_6\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons H_3O^+\,(aq) + C_6H_7O_6^-\,(aq).$$

b. Voir le tableau d'avancement de la réaction en bas de page.

Soit V le volume de la solution. La valeur du pH de la solution permet de déduire la concentration finale en ions H_3O^+ : $[H_3O^+] = 10^{-pH}$ et donc la quantité d'ions H_3O^+ $n_{H_3O^+} = [H_3O^+] \times V$ qui correspond à l'avancement final x_f.

A. N. : $x_f = 10^{-2{,}9} \times 0{,}20 = 2{,}5 \times 10^{-4}$ mol.

c. La quantité finale d'ion ascorbate $C_6H_7O_6^-$ est aussi égale à x_f donc $[C_6H_7O_6^-] = [H_3O^+] = 10^{-pH}$.

La quantité finale d'acide ascorbique $C_6H_8O_6$ est $n - x_f$ où n est la quantité initiale d'acide ascorbique avec $n = \dfrac{m}{M}$ (avec m la masse d'acide ascorbique et M sa masse molaire).

Tableau de la question b. de l'exercice 35 :

		$C_6H_8O_6\,(aq)$	+	$H_2O\,(\ell)$	$\rightleftharpoons$	$H_3O^+\,(aq)$	+	$C_6H_7O_6^-\,(aq)$
État	**Avancement**	**Quantités de matière**						
initial	0	n		excès		0		0
final	x_f	$n - x_f$		excès		x_f		x_f

D'où : $[C_6H_8O_6] = \dfrac{\dfrac{m}{M} - x_f}{V}$

A.N. : $[C_6H_7O_6^-] = 10^{-2,9} = 1,3 \times 10^{-3}$ mol·L^{-1}.
$M = 6 \times 12 + 8 + 6 \times 16 = 176$ g·mol^{-1} ;

$$[C_6H_8O_6] = \frac{\dfrac{0,50}{176} - 2,5 \times 10^{-4}}{0,2} = 1,3 \times 10^{-2} \text{ mol·L}^{-1}.$$

36. ★ Le pH de l'eau

> COMPÉTENCES : **Analyser, connaître, réaliser, valider.**

1. a. L'eau pure est une solution neutre. À 25°C, son pH vaut 7.

b. Les valeurs de pH sont différentes de 7 donc ces différentes eaux ne sont pas « pures ».

2. a. Réaction équilibrée de l'acide faible avec l'eau :
$(CO_2, H_2O)\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons H_3O^+\,(aq) + HCO_3^-\,(aq)$.

b. D'après l'équation précédente, les solutions dans lesquelles sont dissoutes du dioxyde de carbone sont acides. C'est le cas de l'eau distillée du laboratoire laissée à l'air libre, qui dissout le dioxyde de carbone atmosphérique et du Perrier gazéifié par du dioxyde de carbone gazeux.

37. ★ Acide fort ou faible ?

> COMPÉTENCES : **Connaître, réaliser, valider.**

a. La base conjuguée de l'acide R–CO_2H a pour formule R–CO_2^-.

b. La réaction d'un acide fort avec l'eau est totale. La quantité d'ions H_3O^+ produite est égale à la quantité initiale d'acide fort introduit. La concentration en ions H_3O^+ est donc dans ce cas égale à la concentration initiale de l'acide : $[H_3O^+] = c$. Or la valeur de pH permet de déterminer $[H_3O^+] = 10^{-pH} = 10^{-3,7} = 2,0 \times 10^{-4}$. Cette valeur est inférieure à c, l'acide est donc faible.

c. R–$CO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons H_3O^+\,(aq) + R$–$CO_2^-\,(aq)$.

38. ★ Mesure de pH et incertitude

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

1. $[H_3O^+] = 10^{-pH} = 10^{-5,23} = 5,888 \times 10^{-6}$ mol·L^{-1}.

2. a. pH = 5,23 ± 0,05.

b. Le pH est compris entre les valeurs 5,18 et 5,28.
$[H_3O^+]$ est compris entre :
$[H_3O^+]_{max} = 10^{-5,18} = 6,61 \times 10^{-6}$ mol·L^{-1}
et $[H_3O^+]_{min} = 10^{-5,28} = 5,25 \times 10^{-6}$ mol·L^{-1}.
On peut choisir comme estimateur pour $[H_3O^+]$ la moyenne de ces deux extrêmes :

$$\frac{[H_3O^+]_{max} + [H_3O^+]_{min}}{2}.$$

Pour évaluer l'incertitude $U[H_3O^+]$, on peut utiliser l'encadrement : $2U[H_3O^+] = ([H_3O^+]_{max} - [H_3O^+]_{min})$

$$\text{donc } U[H_3O^+] = \frac{[H_3O^+]_{max} - [H_3O^+]_{min}}{2}.$$

A. N. : $[H_3O^+] = (5,9 \pm 0,7) \times 10^{-6}$ mol·L^{-1}.

39. ★ Interprétation de graphiques

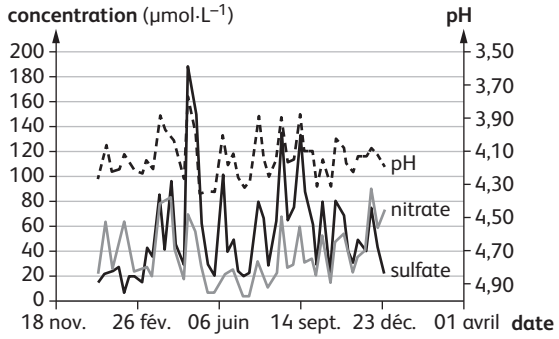
> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider, communiquer.**

a. Une lecture rapide aboutirait à la conclusion que le pH demeure constant tandis que les concentrations en ions nitrate et sulfate varient. Cela est dû au choix de l'échelle de pH qui ne permet pas de mettre en évidence des variations de quelques dixièmes d'unité autour d'un pH égal à 4.

b. Le choix des échelles doit permettre d'observer les variations lorsqu'elles sont significatives (c'est-à-dire supérieures aux incertitudes de mesure), ce qui est le cas des variations de toutes les grandeurs ici. Les échelles de concentration en ions nitrate et sulfate du graphique 2 sont bien adaptées, ainsi que l'échelle de pH du graphique 1. La représentation en histogramme du graphique 1 n'est pas pertinente. Elle rend difficile l'observation des variations de chacune des grandeurs. Elle est plus adaptée à la comparaison de plusieurs grandeurs qu'au suivi des variations de l'une d'elles.

c. Choisir une échelle inverse permettrait de montrer que l'augmentation de l'acidité (opposée au pH) est concomitante avec l'augmentation des concentrations en ions nitrate et sulfate.

d. Une proposition de graphique :



40. ★ Publicité pour un savon

> COMPÉTENCES : **Analyser, s'approprier, valider, communiquer.**

a. L'expérience est une mesure du pH de solutions savonneuses à l'aide de papier pH.

b. Un savon contient des ions carboxylate R–CO_2^-, qui sont des bases faibles.

c. La couleur du papier pH change quelle que soit le pH pour prendre une couleur particulière. Le papier pH réagit donc à tout pH et pas seulement à pH élevé.

d. La couleur du papier pH est caractéristique d'une solution légèrement acide (pH 5-6). C'est préférable car le pH de la peau est lui aussi de cet ordre.

41. ★ pH des sols

> COMPÉTENCES : **Analyser, s'approprier, valider, communiquer.**

On ne peut mesurer que le pH d'une solution. Il faut donc réaliser des « solutions de sol », en agitant longtemps une masse de terre dans un volume d'eau. Après filtration, on mesure le pH de la solution avec un pH-mètre. Pour comparer différents sols, il faut que les solutions soient préparées avec la même masse de terre et le même volume d'eau. Le taux d'humidité de la terre

peut varier de façon considérable selon les conditions de prélèvement Il est préférable de sécher la terre en la plaçant à l'étuve avant de peser les échantillons pour préparer des solutions de sol à partir d'une même masse de terre sèche.
Pour favoriser le transfert des ions H_3O^+ de la terre vers la solution on peut utiliser plutôt que de l'eau pure une solution de chlorure de potassium (les ions H_3O^+ de la terre sont remplacés par les ions K^+ de la solution).
Exemple de protocole :
– Recueillir des échantillons de sol, les placer à l'étuve pour les déshydrater.
– Les broyer finement.
Pour chaque échantillon :
– Peser 10 g de terre sèche.
– La placer dans un bécher et y ajouter 25 mL de solution de chlorure de potassium ($K^+(aq)$, $Cl^-(aq)$) de concentration 0,1 mol.L^{-1}.
– Ajouter un barreau magnétique, agiter sur un agitateur magnétique.
– Laisser reposer longuement pour décanter.
– Mesurer le pH de la solution surnageant à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné.

42. ★ In English Please

> COMPÉTENCES : **Analyser, s'approprier.**

a. Comme acides d'origine végétale, T. Lowry cite : *vinegar* obtenu à partir de vin ; *citric acid* présent dans le jus de citron et *malic acid* dans les pommes.
Pour les acides d'origine minérale, il cite *vitriol*, *aqua fortis* ou *nitric acid* et *muriatic acid*.
b.

Nom anglais	Nom français courant	Formule de l'acide	Formule de la base
vinegar	acide acétique	$C_2H_4O_2$	$C_2H_3O_2^-$
citric acid	acide citrique	$C_6H_8O_7$	$C_6H_7O_7^-$
malic acid	acide malique	$C_4H_6O_5$	$C_4H_5O_5^-$
vitriol	acide sulfurique	H_2SO_4	HSO_4^-
aqua fortis	acide nitrique	HNO_3	NO_3^-
muriatic acid	acide chlorhydrique	H_3O^+, Cl^-	H_2O

c. Les trois acides d'origine végétale ont en commun le groupe carboxyle –COOH.

43. ★ pH des océans

> COMPÉTENCES : **Analyser, valider.**

a. De manière générale, quelle que soit l'origine de l'eau, le pH est plus élevé en surface qu'en profondeur. Il diminue de façon conséquente avec la profondeur sur le premier kilomètre, puis se stabilise au-delà de 2 km de profondeur.
b. Le phytoplancton réalise la photosynthèse à faible profondeur (pour pouvoir exploiter l'énergie du rayonnement solaire).
L'équation de la photosynthèse est :

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2.$$

Elle montre la consommation du dioxyde de carbone. Ce dernier est acide, sa consommation entraîne une diminution de l'acidité et donc une augmentation du pH. À plus grande profondeur, le dioxyde de carbone n'est plus consommé et le pH est plus faible.

44. ★ Interpréter des résultats d'expérience

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. b. L'équation de la réaction totale est :

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

L'avancement final de la réaction est égal à la quantité initiale de réactif limitant.

Expérience	Réactif limitant	x_f	x_f (mmol)	V_t (mL)	c_f (mol·L^{-1})
1	proportions stœchiométriques	$c_A V_A$	10	200	$5{,}0 \times 10^{-2}$
2	proportions stœchiométriques	$c_A V_A$	5,0	100	$5{,}0 \times 10^{-2}$
3	H_3O^+	$c_A V_A$	50	150	$3{,}3 \times 10^{-1}$
4	HO^-	$c_B V_B$	50	150	$3{,}3 \times 10^{-1}$

c. La variation de température dépend de l'avancement volumique (même variation pour deux valeurs de c_f identiques, expériences 1-2 et 3-4, variations différentes pour deux valeurs de c_f différentes).

45. ★ Fiabilité d'une recherche sur Internet

> COMPÉTENCES : **Analyser, valider, communiquer.**

La correction dépend des pages retenues par les élèves.

46. ★★ S'auto-évaluer

L'eau de pluie acide contient des ions nitrate, chlorure et sulfate, produits des réactions totales de l'acide nitrique, de chlorure d'hydrogène et d'acide sulfurique avec l'eau :
(1) $HNO_3(aq) + H_2O\ (\ell) \rightarrow NO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$
(2) $HCl(aq) + H_2O\ (\ell) \rightarrow Cl^-(aq) + H_3O^+(aq)$
(3) $H_2SO_4(aq) + 2H_2O\ (\ell) \rightarrow SO_4^{2-}(aq) + 2H_3O^+(aq)$
Considérons un échantillon d'eau de pluie de volume V contenant une quantité n_1 d'ions NO_3^-, une quantité n_2 d'ions Cl^- et une quantité n_3 d'ions SO_4^{2-}.
La réaction **(1)** a produit une quantité n_1 d'ions NO_3^- et une quantité n_1 d'ions H_3O^+.
La réaction **(2)** a produit une quantité n_2 d'ions Cl^- et une quantité n_2 d'ions H_3O^+.
La réaction **(3)** a produit une quantité n_3 d'ions SO_4^{2-} et une quantité $2n_3$ d'ions H_3O^+.
La quantité totale d'ions H_3O^+ présente est donc $n_1 + n_2 + 2n_3$ et la concentration des ions H_3O^+ est :

$$[H_3O^+] = \frac{n_1 + n_2 + 2n_3}{V} = c_1 + c_2 + 2c_3$$ où c_1, c_2 et c_3 sont les concentrations molaires des ions nitrate, chlorure et sulfate.

On connaît les concentrations massiques c_{m1}, c_{m2} et c_{m3} de ces ions dans l'eau de pluie. On peut en déduire leurs concentrations molaires : $c_1 = \frac{c_{m1}}{M_1}$; $c_2 = \frac{c_{m2}}{M_2}$ et $c_3 = \frac{c_{m3}}{M_3}$ où M_1, M_2 et M_3 sont les masses molaires des ions nitrate, chlorure et sulfate.

D'où : $[H_3O^+] = \frac{c_{m1}}{M_1} + \frac{c_{m2}}{M_2} + 2\frac{c_{m3}}{M_3}$.

On en déduit le pH de l'eau de pluie :

$$pH = -\log[H_3O^+] = -\log\left(\frac{c_{m1}}{M_1} + \frac{c_{m2}}{M_2} + 2\frac{c_{m3}}{M_3}\right).$$

A.N. : $M_1 = 14+3\times16 = 62$ g·mol^{-1} ; $M_2 = 35{,}5$ g·mol^{-1} ; $M_3 = 32 + 16\times4 = 96$ g·mol^{-1}

$$pH = -\log\left(\frac{1{,}24\times10^{-3}}{62} + \frac{0{,}35\times10^{-3}}{35{,}5} + \frac{2\times2{,}88\times10^{-3}}{96}\right) = 4{,}0.$$

pH $<$ 7, il s'agit bien de pluies « acides ».

47. ★★ Notice d'un pH-mètre

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

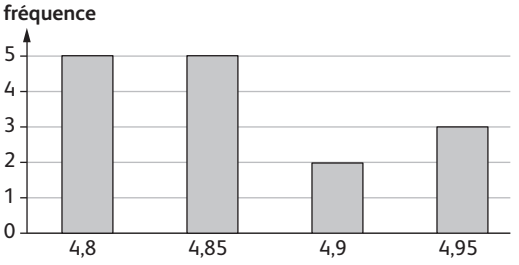
1. a. D'après la notice, l'incertitude sur la mesure de pH est de 0,01 unité.

b. Les informations relatives à l'étalonnage sont dans la rubrique « calibrage ». L'étalonnage doit se faire avec deux solutions (2 points d'après la notice). L'appareil peut identifier automatiquement 3 groupes de 2 solutions tampon.

2. a. Les différences entre les mesures effectuées portent sur le chiffre des 1/10 d'unité pH. La dispersion des mesures semble supérieure à l'incertitude donnée par la notice.

b. Valeur moyenne : 4,81, écart-type : 0,06. Pour un intervalle de confiance de 95 % : pH = 4,81 ± 2 × 0,06, soit pH = 4,8 ± 0,1.

c.



3. a. Le pH-mètre permet une mesure dans la plage 0-14, mais la sonde de pH ne permet une mesure que dans l'intervalle 0-12. Il n'est donc pas possible de mesurer un pH de 13 avec cette sonde.

b. Il faut conserver la sonde dans une solution de chlorure de potassium à 3 mol·L^{-1}.

48. ★★ Lac acide

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

Lorsque le niveau d'eau du lac augmente, le volume d'eau augmente mais la quantité d'ions H_3O^+ reste constante. La concentration en ions H_3O^+ diminue par dilution et le pH augmente.

La quantité d'ions H_3O^+ est $n = 10^{-pH_i} \times V_i$ où V_i est le volume initial du lac et pH_i son pH initial.

Lorsque le niveau augmente de h, le volume du lac devient $V_f = V_i + Sh$ (si on assimile le lac à un cylindre de surface S). La concentration en ions H_3O^+ devient :

$$[H_3O^+]_f = \frac{n}{V_f}.$$

Le pH final est $pH_f = -\log\frac{10^{pH_i}V_i}{V_i + Sh} = pH_i - \log\frac{V_i}{V_i + Sh}$.

La variation de pH est $pH_f - pH_i = -\log\frac{V_i}{V_i + Sh}$.

A.N. : $pH_f - pH_i = \log\frac{32\times10^6}{32\times10^6 + 41\times10^4\times10} = 0{,}05$

49. ★★ Neutralisation d'une solution acide

> COMPÉTENCES : **Analyser, connaître, réaliser.**

1. a. La masse d'un échantillon de volume V de la solution S_2 est $m_2 = d\rho V$ où ρ est la masse volumique de l'eau. Cet échantillon contient une masse de chlorure d'hydrogène $m_{HCl} = x\,m_2 = x\,d\rho V$ et la quantité de chlorure d'hydrogène (de masse molaire M_{HCl}) présente est donc $n_{HCl} = \frac{m_{HCl}}{M_{HCl}}$.

A.N. : $\rho = 1{,}0$ kg·L^{-1} ; $m_{HCl} = 0{,}37\times1{,}2\times1{,}0\times1{,}0 = 0{,}44$ kg ;

$$n_{HCl} = \frac{0{,}44\times10^3}{(35{,}5+1)} = 12 \text{ mol.}$$

b. La concentration molaire de la solution S_2 est

$$c_2 = \frac{n_{HCl}}{V}.$$

A. N. : $c_2 = \frac{12}{1} = 12$ mol·L^{-1}.

On souhaite obtenir une solution fille de volume V et de concentration c_A.

On doit prélever un volume V_2 de la solution mère vérifiant $c_2V_2 = c_AV$, donc $V_2 = \frac{c_AV}{c_2}$.

A. N. : $V_2 = \frac{20\times1{,}0}{12} = 1{,}7$ mL.

2. a. Un échantillon de volume $V = 1{,}0$ L de la solution S_3 contient une quantité $n_A = c_AV$ d'ions H_3O^+ (issus de la réaction totale entre le chlorure d'hydrogène et l'eau).

A. N. : $n_A = 20$ mmol.

On y ajoute une quantité $n_B = c_BV_B$ d'ions hydroxyde où V_B est le volume occupé par 6 gouttes de la solution S_1.

Le volume d'une goutte délivrée par la burette est :

$V_B = \frac{1{,}0}{20_2} = 5{,}0\times10^{-2}$ mL donc

$V_B = 6\times5{,}0\times10^{-2} = 3{,}0\times10^{-1}$mL et

$n_B = 10\times3{,}0\times10^{-1} = 3{,}0$ mmol.

Il se produit la réaction quasi-totale suivante :

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

Son tableau d'avancement est :

		$H_3O^+(aq) + HO^-(aq) \rightarrow 2H_2O(\ell)$		
État	**Avancement**	**Quantités de matière**		
initial	0	$n_A > n_B$	n_B	excès
final	n_B	$n_A - n_B$	0	excès

Il reste donc une quantité $n_A - n_B$ d'ions H_3O^+ en solution et une concentration $[H_3O^+] = \dfrac{n_A - n_B}{V}$.

A. N. : $[H_3O^+] = \dfrac{20 - 3{,}0}{1{,}0} = 1{,}7$ mmol·L^{-1}.

b. Pour obtenir une solution neutre, il faudrait introduire autant d'ions HO^- que d'ions H_3O^+, ce qui correspond à un nombre de gouttes p vérifiant : $n_A = c_B \times p\ v_B$, soit $p = \dfrac{n_A}{c_B v_B}$.

A. N. : $p = \dfrac{20}{10 \times 3{,}0 \times 10^{-1}} = 6{,}6$.

La neutralité s'obtiendra donc entre la 6e et la 7e gouttes versées.

50. Examen pH-métrique

> COMPÉTENCES : **Analyser, connaître, réaliser.**

Le reflux gastro-œsophagien du nourrisson est une anormale remontée du contenu de l'estomac dans l'œsophage. Le milieu stomacal est très acide (pH de 1 à 3 d'après les données du document 5) et le reflux entraîne une brûlure des parois de l'œsophage.

Le diagnostic repose sur un examen pH-métrique. Il consiste en une mesure du pH de l'œsophage grâce à une sonde placée à l'extrémité de l'œsophage (quelques cm au dessus de la jonction avec l'estomac d'après le document 2) et reliée à un pH-mètre. La mesure est effectuée en continu sur plusieurs heures. Les courbes tracées représentent l'évolution du pH au cours du temps. Les heures de prises de biberon sont indiquées.

Les premières courbes proposées concernent un relevé du pH de l'œsophage d'un nourrisson sain, ainsi que l'allure de l'évolution du pH de son estomac.

La sonde relève un pH œsophagien constant voisin de 7, alors que le pH stomacal lui, décroît entre deux biberons (document 4). Nous pouvons expliquer cette évolution. La salive et le lait ont même pH (document 5). Le lait absorbé par le nourrisson ne modifie pas le pH de l'œsophage. En revanche, son introduction dans l'estomac provoque une augmentation du pH (l'estomac est rempli de lait de pH égal à 7). Le pH de l'estomac décroît de 7 (pH du lait) à 1 lorsque la digestion se produit. Il augmente de nouveau au biberon suivant.

Sur le tracé du pH œsophagien d'un nourrisson présentant un reflux, le pH n'est plus constant. Les variations observées ont la même allure entre deux biberons, dates auxquelles le pH mesuré est de 7, à cause du lait absorbé. Le tracé présente des décroissances périodiques du pH (d'une durée de quelques minutes toutes les 20 à 30 min), d'amplitudes de plus en plus grandes (1 unité pH 1 h après le biberon, 3 unités 1h45 après le biberon et jusqu'à 6 unités pH 3 heures après).

Nous pouvons interpréter chaque décroissance par un reflux du contenu de l'estomac vers l'œsophage : le pH mesuré par la sonde est alors le pH de l'estomac. Comme nous l'avons vu pour un nourrisson sain, le pH de l'estomac diminue entre deux biberons, le contenu de l'estomac qui remonte dans l'œsophage est de plus en plus acide ce qui explique pourquoi l'amplitude des variations de pH enregistrées est de plus en plus grande lorsque la durée s'écoulant après le biberon augmente.

La variation du pH de l'œsophage du nourrisson malade peut donc s'expliquer par la présence d'un reflux périodique du contenu de l'estomac dans l'œsophage.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

51. L'ACIDE FORMIQUE EN MILIEU BIOLOGIQUE

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

1. a. L'acide formique est un acide au sens de Brönsted car il est susceptible de céder un ion H^+ pour donner l'ion formiate HCO_2^-.

b. La réaction qui provoque des brûlures est la réaction de l'acide formique avec l'eau. L'acide formique est un acide faible, cette réaction est un équilibre chimique d'équation :

$$HCO_2H\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftharpoons HCO_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$$

2. a. L'acide chlorhydrique est un acide fort, il réagit donc de façon quasi-totale avec l'eau. Le pH d'une solution d'acide fort de concentration c (en mol·L^{-1}) est égal à $-\log c$.

Pour obtenir un pH égal à 2,0 il faut donc une concentration d'acide fort égale à $c = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

b. On suppose, d'après l'énoncé, que l'estomac du tamanoir contient une solution d'acide formique. L'acide formique est un acide faible, il ne réagit pas avec l'eau de façon quasi-totale. Une solution d'acide formique de concentration c' conduira à la formation d'ions oxonium en concentration inférieure à c'. Pour que le pH de la solution soit de 2,0, c'est-à-dire pour que la concentration en ions oxonium soit égale à $1{,}0 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}, il faut donc une concentration en acide formique c' supérieure à $1{,}0 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

c. Le tamanoir ingère un très grand nombre de fourmis. Son estomac contient donc de l'acide formique. On suppose que la quantité d'acide formique est suffisante pour que le pH de son estomac soit égal à 2.

3. a. La dilution diminue la concentration en acide formique, ce qui conduit à une augmentation du pH.

b. Il faut diluer la solution mère, de concentration C_m d'un facteur 1,5. On obtiendra une solution fille de concentration $C_f = \dfrac{C_m}{1{,}5}$.

Pour ce faire, on prélève un volume V_m de solution mère que l'on introduit dans une fiole jaugée de volume V_f puis on complète à l'aide d'eau distillée.
Calculons le volume V_m à prélever pour obtenir une solution fille de volume $V_f = 2{,}0$ L.
La dilution ne modifie pas les quantités de matière donc $C_f V_f = C_m V_m$. On en déduit $V_m = \frac{V_f C_f}{C_m} = \frac{V_f}{1{,}5}$.
A. N. : $V_m = 1{,}3$ L.

52. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

Du lait au yaourt

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Le lait est une solution dont la composition évolue au cours du temps pour donner le yaourt.
D'après le document 1, les modifications notables de la composition sont :
– la diminution de la concentration massique en lactose concomitante avec une augmentation de la concentration en galactose et avec une faible augmentation de la concentration en glucose ;
– la disparition de la caséine soluble au profit de caséine insoluble ;
– l'apparition de l'acide lactique ;
– la présence de bactéries.
L'ensemencement du lait par les bactéries est provoqué d'après l'énoncé.
Le lactose réagit avec l'eau (document 3) pour donner du galactose et du glucose, ce qui explique la diminution de la concentration en lactose et l'augmentation de la concentration en galactose. Le second produit de cette transformation, le glucose, est quant à lui utilisé par la fermentation lactique, processus auquel participent les bactéries (document 4) et conduisant à la formation d'acide lactique.
Cet acide faible (document 4) réagit avec l'eau selon la réaction d'équation :

$$C_3H_6O_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons H_3O^+\,(aq) + C_3H_5O_3^-\,(aq).$$

Cette réaction conduit à l'augmentation de la concentration en ions H_3O^+ dans le milieu et donc à une diminution du pH $= -\log([H_3O^+])$.
Or, d'après le document 2, lorsque le pH diminue les micelles de caséine, initialement soluble, s'agrègent et forment un gel, ce qui explique l'épaississement du lait (par apparition de caséine insoluble)

53. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Chaulage d'un lac acide

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, communiquer, connaître.**

1. La surface du lac visible sur le document 2 forme, de façon approximative, un disque de rayon R voisin de 400 m d'après l'échelle. Si l'on assimile le lac à un cylindre de rayon R et de hauteur $h = 10$m (profondeur moyenne du lac d'après le document 2), on peut évaluer son volume : $V = \pi R^2 h = \pi \times 400^2 \times 10 \approx 5 \times 10^6$ m^3.
2. L'ajout de carbonate de calcium $CaCO_3$ (s) permet de relever le pH du lac car le carbonate de calcium peut réagir avec les ions H_3O^+ selon la réaction suivante :
$H_3O^+\,(aq) + CaCO_3\,(s) \rightarrow Ca^{2+}\,(aq) + HCO_3^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$ (d'après les données). Les ions H_3O^+ sont donc consommés. Par conséquent, leur concentration diminue, ce qui entraîne l'augmentation souhaitée du pH $= -\log([H_3O^+])$.
On connaît le pH initial du lac et le pH final souhaité. On peut en déduire les concentrations initiales et finales en ions H_3O^+ : $[H_3O^+] = 10^{-pH}$ (en mol·L^{-1}) ainsi que les quantités correspondantes en utilisant le volume du lac calculé en 1.
$n_{H_3O^+} = [H_3O^+] \times V = 10^{-pH} \times V$
$n_{H_3O^+,\,ini} = 10^{-5{,}5} \times 10^3 \times 5 \times 10^6 = 1{,}6 \times 10^4$ mol
$n_{H_3O^+,\,fin} = 10^{-6} \times 10^3 \times 5 \times 10^6 = 5 \times 10^3$ mol
Construisons le tableau d'avancement de la réaction (voir le tableau en bas de page) :
$H_3O^+\,(aq) + CaCO_3\,(s) \rightarrow Ca^{2+}\,(aq) + HCO_3^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
Il s'agit d'une réaction quasi-totale d'après le symbolisme utilisé. Le réactif limitant doit être $CaCO_3$ pour qu'il reste des ions H_3O^+ en fin de réaction.
On peut en déduire la quantité n de carbonate de calcium à utiliser et la masse $m = n \times M_{CaCO3}$ correspondante :
$n = x_f = 1{,}6 \times 10^4 - 5 \times 10^3 = 1{,}1 \times 10^4$ mol
$m = n \times M_{CaCO_3} = 1{,}1 \times 10^4 \times 100 = 1{,}1 \times 10^6$ g
$= 1{,}1 \times 10^3$ kg
La masse de carbonate de calcium nécessaire à l'opération de chaulage est donc de 1,1 tonne.

54. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Modifier un pH

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

Tableau de la question 2 de l'exercice 53 :

		$H_3O^+(aq)$ +	$CaCO_3(s)$ →	$Ca^{2+}(aq)$ +	$HCO_3^-(aq)$ +	$H_2O(\ell)$
État	**Avancement**	**Quantités de matière (mol)**				
initial	0	$1{,}6 \times 10^4$	n			
final	x_f	$1{,}6 \times 10^4 - x_f = 5 \times 10^3$	$n - x_f = 0$	x	x	

CHAPITRE

16

COMPRENDRE

Couples acide faible/base faible. Solution tampon

> Manuel pages 360 à 383

Choix pédagogiques

Dans ce second chapitre portant sur le thème « Réaction chimique par échange de protons », on s'intéresse plus particulièrement aux couples acide faible/base faible introduits dans le chapitre 15. La constante d'acidité de ces couples est définie comme une constante caractéristique du couple, ne dépendant que de la température. Elle relie, lorsque le système chimique n'évolue plus, les concentrations en acide faible, en sa base conjuguée et en ions H_3O^+. La relation introduite, écrite sous sa forme logarithmique, sert de base à la construction des diagrammes de prédominance. Ces derniers permettent de déterminer, dans une solution de pH donné, l'espèce acido-basique prédominante d'un couple. L'intérêt de ces diagrammes est tout d'abord mis en évidence sur les indicateurs colorés, introduits dans ce chapitre. Leur usage pour les titrages acido-basique sera expliqué dans le chapitre 21. Sont ensuite construits, en s'appuyant sur ceux des acides carboxyliques et des amines, les diagrammes de prédominance des acides α-aminés. Leur utilisation pour comprendre la séparation des acides α–aminés par électrophorèse est expliquée en exercice. Dans ce chapitre, on évoque enfin le contrôle du pH en introduisant la notion de solution tampon. Pour mettre en évidence l'importance du contrôle du pH dans les milieux biologiques, les exemples de la régulation du pH sanguin et de la variation de l'activité catalytique des enzymes avec le pH sont présentés dans le cours et en activité documentaire. Ils sont repris dans les exercices. La notion de catalyse enzymatique introduite au chapitre 12 est alors réinvestie.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Le contrôle du plasma sanguin.

Comment la valeur du pH sanguin est-elle contrôlée ?

Le sang est un milieu dont le pH doit être régulé de manière à être maintenu dans un intervalle étroit autour de la neutralité. Comment éliminer un excès d'ions H^+ ou un excès d'ions HO^- qui pourrait subvenir suite en particulier à une déficience respiratoire (excès ou défaut de CO_2 dans le sang) ? Les élèves peuvent être guidés sur la nécessité de la présence conjointe, dans le sang, d'un acide faible qui pourrait réagir avec un excès d'ions HO^- et d'une base faible qui pourrait réagir avec un éventuel excès d'ions H^+. La réalisation d'une solution tampon pourra être abordée dans l'activité documentaire 3 et l'analyse de la régulation du pH sanguin grâce à l'exercice 30.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Détermination d'une constante d'acidité

Commentaires

Cette activité répond à la compétence exigible du programme « *déterminer expérimentalement une constante d'acidité* ». Elle s'appuie sur la mesure de pH de solutions d'acide éthanoïque, d'ion éthanoate, d'ammonium et d'ions chlorure. L'activité permet de mettre en évidence la constance de l'expression :

$\frac{[H_3O^+] \times [\text{base faible}]}{[\text{acide faible}]}$ et d'introduire ainsi la constante d'acidité du couple.

Toutefois, comme des mesures de pH sont utilisées, il est préférable, pour des raisons de précision, de calculer le logarithme décimal de cette expression et d'en montrer la constance.

Réponses

RÉALISER

1. Plusieurs dilutions sont demandées (4 au total). Pour gagner du temps il est envisageable de demander à chaque binôme de faire simplement les dilutions de la solution d'acide ou de la solution de base et d'échanger les solutions avec un autre binôme du même groupe.

2. a. Voir les résultats de la question 4.

b. Utilisation des relations $[H_3O^+] = 10^{-pH}$ et $[HO^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]}$ (avec les concentrations en $mol \cdot L^{-1}$).

ANALYSER

3. a.

$CH_3CO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons CH_3CO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

$CH_3CO_2^-\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons CH_3CO_2H\,(aq) + HO^-\,(aq)$

Ou

$NH_4^+(aq) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons NH_3(aq) + H_3O^+(aq)$

$NH_3(aq) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons NH_4^+(aq) + HO^-(aq)$

b. En notant V le volume de la solution :

		$HA\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons A^-(aq) + H_3O^+(aq)$			
État	**Avancement**	**Quantités de matière**			
initial	0	c_AV	excès	0	0
final	x	$c_AV - x$	excès	x	x

D'après le tableau :

$$[A^-] = \frac{x}{V} = [H_3O^+] \quad \text{et} \quad [HA] = \frac{c_AV - x}{V} = c_A - [H_3O^+].$$

		$A^-(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons HA\,(aq) + HO^-(aq)$			
État	**Avancement**	**Quantités de matière**			
initial	0	c_BV	excès	0	0
final	x	$c_BV - x$	excès	x	x

D'après le tableau :

$$[HA] = \frac{x}{V} = [HO^-] \quad \text{et} \quad [A^-] = \frac{c_BV - x}{V} = c_B - [HO^-].$$

RÉALISER

4. a.

• Solutions d'acide éthanoïque

c_A (mol·L^{-1})	pH	$[H_3O^+]$ (mol·L^{-1})	$[HO^-]$ (mol·L^{-1})	$[CH_3CO_2H]$ (mol·L^{-1})	$[CH_3CO_2^-]$ (mol·L^{-1})	pK_a
$1{,}0\times10^{-2}$	3,4	$4{,}0\times10^{-4}$	$2{,}5\times10^{-11}$	$9{,}6\times10^{-3}$	$4{,}0\times10^{-4}$	4,8
$1{,}0\times10^{-3}$	3,9	$1{,}3\times10^{-4}$	$7{,}9\times10^{-11}$	$8{,}7\times10^{-4}$	$1{,}3\times10^{-4}$	4,7
$1{,}0\times10^{-4}$	4,5	$3{,}2\times10^{-5}$	$3{,}2\times10^{-10}$	$6{,}8\times10^{-5}$	$3{,}2\times10^{-5}$	4,8

• Solutions d'ion éthanoate

c_B (mol·L^{-1})	pH	$[H_3O^+]$ (mol·L^{-1})	$[HO^-]$ (mol·L^{-1})	$[CH_3CO_2H]$ (mol·L^{-1})	$[CH_3CO_2^-]$ (mol·L^{-1})	pK_a
$1{,}0\times10^{-2}$	8,4	$4{,}0\times10^{-9}$	$2{,}5\times10^{-6}$	$2{,}5\times10^{-6}$	$1{,}0\times10^{-2}$	4,8
$1{,}0\times10^{-3}$	7,9	$1{,}3\times10^{-8}$	$7{,}9\times10^{-7}$	$7{,}9\times10^{-7}$	$1{,}0\times10^{-3}$	4,8
$1{,}0\times10^{-4}$	7,4	$4{,}0\times10^{-8}$	$2{,}5\times10^{-7}$	$2{,}5\times10^{-7}$	$1{,}0\times10^{-4}$	4,8

• Solutions de chlorure d'ammonium

c_A (mol·L^{-1})	pH	$[H_3O^+]$ (mol·L^{-1})	$[HO^-]$ (mol·L^{-1})	$[NH_4^+]$ (mol·L^{-1})	$[NH_3]$ (mol·L^{-1})	pK_a
$1{,}0\times10^{-2}$	5,6	$2{,}5\times10^{-6}$	$4{,}0\times10^{-9}$	$1{,}0\times10^{-2}$	$2{,}5\times10^{-6}$	9,2
$1{,}0\times10^{-3}$	6,1	$7{,}9\times10^{-7}$	$1{,}3\times10^{-8}$	$1{,}0\times10^{-3}$	$7{,}9\times10^{-7}$	9,2
$1{,}0\times10^{-4}$	6,6	$2{,}5\times10^{-7}$	$4{,}0\times10^{-8}$	$1{,}0\times10^{-4}$	$2{,}5\times10^{-7}$	9,2

• Solutions d'ammoniac

c_B (mol·L^{-1})	pH	$[H_3O^+]$ (mol·L^{-1})	$[HO^-]$ (mol·L^{-1})	$[NH_4^+]$ (mol·L^{-1})	$[NH_3]$ (mol·L^{-1})	pK_a
$1{,}0\times10^{-2}$	11,0	$2{,}5\times10^{-11}$	$4{,}0\times10^{-4}$	$4{,}0\times10^{-4}$	$9{,}6\times10^{-3}$	9,2
$1{,}0\times10^{-3}$	10,0	$7{,}9\times10^{-11}$	$1{,}3\times10^{-4}$	$1{,}3\times10^{-4}$	$8{,}7\times10^{-4}$	9,3
$1{,}0\times10^{-4}$	9,5	$3{,}2\times10^{-10}$	$3{,}2\times10^{-5}$	$3{,}2\times10^{-5}$	$6{,}8\times10^{-5}$	9,2

VALIDER

b. La grandeur calculée dans la dernière colonne, notée pK_a, est constante pour un même couple acido-basique, quelles que soient les concentrations (à 0,1 unité près, ce qui correspond à l'incertitude sur la mesure du pH). La grandeur $K_a = 10^{-pK_a}$ est donc aussi constante. Elle diffère d'un couple acido-basique à un autre.

Prolongement possible de l'activité

5. a. Valider. Montrer à l'aide des résultats que l'un des deux acides est plus fort que l'autre et que l'une des deux bases est plus forte que l'autre.

b. Analyser. La constante d'acidité est caractéristique du couple acide faible/base faible considéré. Comment peut-elle permettre de classer les acides faibles et les bases faibles ?

Réponses

5. a. L'acide le plus fort est celui dont l'avancement de la réaction avec l'eau est le plus grand, pour une concentration donnée. Il s'agit de l'acide éthanoïque.

La base la plus forte est celle dont l'avancement de la réaction avec l'eau est le plus grand, pour une concentration donnée. Il s'agit de l'ammoniac

b. Il semble que l'acide le plus fort corresponde au couple de plus grand K_a (ou plus faible pK_a) et que la base la plus forte corresponde au couple de plus petit K_a (ou plus grand pK_a).

2. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Étude d'un indicateur coloré

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

3. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Réalisation d'une solution tampon

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Influence du pH dans les milieux biologiques

Commentaires

Cette activité documentaire suppose que la catalyse enzymatique a déjà été étudiée. Elle permet de réinvestir les notions de liaisons faibles introduites en classe de 1re S, la liaison hydrogène en particulier.

La sensibilité des enzymes au milieu dans lequel elles sont dissoutes a été évoquée dans le chapitre 12. Dans cette activité, on se propose de comprendre les causes de cette sensibilité.

Il est nécessaire d'avoir au préalable évoqué les diagrammes de prédominance.

Une animation interactive est proposée pour conclure l'activité. Elle utilise le modèle clé-serrure fréquemment évoqué pour modéliser l'adéquation entre une enzyme et son substrat. Il est alors important d'insister sur la notion de modèle : la possibilité de création de liaisons entre le substrat et l'enzyme est modélisée par une complémentarité de forme. Les élèves sont invités à rédiger une synthèse après avoir visualisé l'animation.

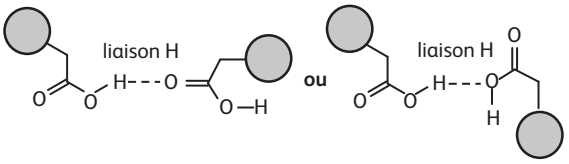
Réponses

S'APPROPRIER

1. La modification du pH entraîne une rupture des liaisons qui maintenaient la protéine repliée sur elle-même. La protéine se déplie.

ANALYSER

2. a. La liaison hydrogène s'établit entre l'atome d'hydrogène lié à un atome d'oxygène d'un résidu d'acide aminé et un atome d'oxygène d'un autre résidu d'acide aminé :



Si les acides aminés sont sous leur forme basique, les atomes d'hydrogène ne sont plus présents et la liaison ne peut plus s'établir.

b. Lorsque le pH augmente et dépasse le pK_a du couple acide aspartique/ion aspartate, la forme prédominante du couple est la forme basique. Comme on l'a vu dans la question **2. a.**, la liaison hydrogène se rompt.

COMMUNIQUER

3. Une proposition de synthèse :

Pour pouvoir catalyser la transformation d'un substrat en produit, l'enzyme doit établir des liaisons faibles avec le substrat au sein de son site actif.

Sur l'animation, la possibilité d'établir des liaisons est modélisée par une adéquation de forme entre le substrat et l'enzyme. Il existe un pH, appelé pH optimal pour lequel l'adéquation est parfaite, les liaisons peuvent s'établir et l'enzyme peut jouer son rôle de catalyseur.

Lorsqu'on s'éloigne de ce pH, il n'y a plus d'adéquation de forme, ce qui signifie que l'enzyme ne peut plus catalyser la transformation du substrat en produit.

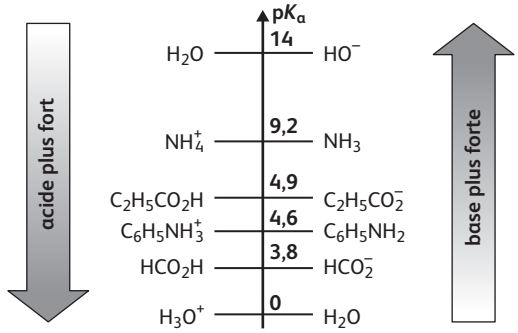
Le pH optimal dépend de la nature de l'enzyme.

On peut faire remarquer aux élèves que la pepsine est une enzyme stomacale : son pH optimal de 2 est bien adapté au pH très acide de l'estomac alors que la trypsine a un pH optimal de 8, voisin du pH de l'intestin dans lequel elle agit. La pepsine et la trypsine catalysent la rupture par hydrolyse de certaines liaisons peptidiques.

EXERCICES Appliquer le cours

12. Classer des couples acide faible/base faible

Acide	Base conjuguée	K_a	pK_a
$C_2H_5CO_2H$	$C_2H_5CO_2^-$	$1{,}3 \times 10^{-5}$	4,9
$C_6H_5NH_3^+$	$C_6H_5NH_2$	$2{,}5 \times 10^{-5}$	4,6
NH_4^+	NH_3	$6{,}3 \times 10^{-10}$	9,2
HCO_2H	HCO_2^-	$1{,}6 \times 10^{-4}$	3,8



13. Déterminer une constante d'acidité

a. $HNO_2\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons NO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

b. On utilise la relation $K_a = \dfrac{NO_2^- \times [H_3O^+]}{[HNO_2]}$.

D'après l'équation de la réaction précédente, la réaction produit autant d'ions NO_2^- que d'ions H_3O^+ donc dans la solution : $[NO_2^-] = [H_3O^+]$.

D'où $K_a = \dfrac{[H_3O^+]^2}{[HNO_2]}$

A. N. : $K_a = \dfrac{(3{,}1 \times 10^{-4})^2}{1{,}9 \times 10^{-4}} = 5{,}1 \times 10^{-4}$.

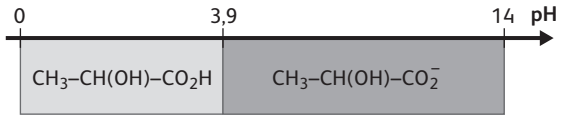
c. $pK_a = -\log K_a$;

A. N. : $pK_a = 3{,}3$.

14. Utiliser un diagramme de prédominace

a. La base conjuguée a pour formule $CH_3–CH(OH)–CO_2^-$.

b. Les domaines de prédominance sont séparés par le pK_a.



c. À un pH de 6,5, l'acide lactique est sous sa forme basique.

15. Utiliser une constante d'acidité

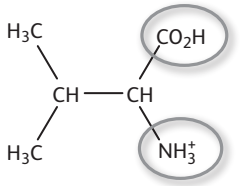
a. L'acide conjugué est l'ion $CH_3–NH_3^+$.

b. $pH = pK_a + \log\left(\dfrac{[CH_3–NH_2]}{[CH_3–NH_3^+]}\right)$.

c. Pour $\frac{[CH_3–NH_2]}{[CH_3–NH_3^+]} = 10$, pH = $pK_a + \log 10 = pK_a + 1$ donc $pK_a = pH - 1 = 10{,}7$.

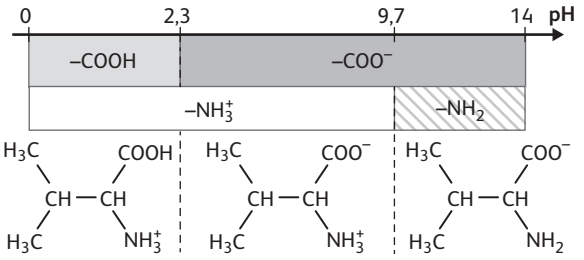
16. Étudier un acide α-aminé

a. Les groupes CO_2H et NH_3^+ ont des propriétés acido-basiques.

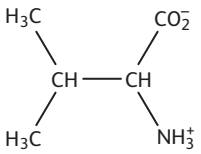


b. C'est le groupe carboxyle qui appartient au couple de pK_a le plus petit. Le pK_a du couple $–CO_2H/–CO_2^-$ vaut 2,3, celui du couple $–NH_3^+ / –NH_2$ vaut 9,7.

c. On trace les domaines de prédominance de l'acide et de la base de chaque couple puis on combine les deux diagrammes :



d. D'après le diagramme, à pH = 7,5 l'espèce prédominante est :



17. Préparer une solution tampon

a. Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu suite à l'addition d'une quantité modérée d'acide ou de base ou suite à une dilution modérée.

b. $pH = pK_a + \log \frac{[CH_3CO_2^-]}{[CH_3CO_2H]}$.

c. Le pH souhaité est supérieur au pK_a ce qui correspond à une situation où la base est majoritaire. Il faut donc introduire davantage de base.

18. Comparer des solutions tampon

a. La solution contient autant d'acide que de sa base conjuguée, le pH est égal au pK_a, soit 9,2.

b.

	Solution 1	Solution 2
c (mol·L^{-1})	10^{-3}	10^{-2}
$pH_{final} - pH_{initial}$	–0,17	–0,02

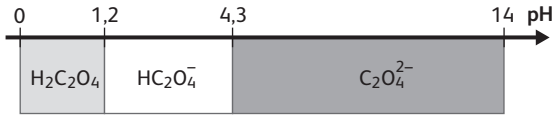
c. La meilleure des solutions tampon est celle pour laquelle les variations de pH sont les plus faibles : c'est la seconde, la plus concentrée.

EXERCICES S'entraîner

19. Exercice résolu dans le manuel

20. Application de l'exercice résolu

1. Le diagramme de prédominance faisant apparaître les trois espèces est :



À pH 8,2, l'espèce prédominante est l'ion $C_2O_4^{2-}$.

2. $[HO^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]} = \frac{K_e}{10^{-pH}}$

A. N. : $[HO^-] = \frac{10^{-14}}{10^{-8,2}} = 1{,}6 \times 10^{-6}$ mol·L^{-1}

21. Exercice résolu dans le manuel

22. Application de l'exercice résolu

1. $C_8H_{10}N_4O_2(aq) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons C_8H_{11}N_4O_2^+(aq) + HO^-(aq)$

2. $[HO^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]} = \frac{K_e}{10^{-pH}}$

A. N. : $[HO^-] = \frac{10^{-14}}{10^{-11,6}} = 4{,}0 \times 10^{-3}$ mol·L^{-1}

3. Voir le tableau en bas de page.

$x_f = [HO^-] \times V$

A. N. : $x_f = 4{,}0 \times 10^{-3} \times 0{,}1 = 4{,}0 \times 10^{-4}$ mol

$n - x_f = 5{,}2 \times 10^{-3} - 4{,}0 \times 10^{-4} = 4{,}8 \times 10^{-3}$ mol.

Donc $[C_8H_{10}N_4O_2] = \frac{n - x_f}{V}$ et $[C_8H_{11}N_4O_2^+] = \frac{x_f}{V}$.

A. N. : $[C_8H_{10}N_4O_2] = \frac{4{,}8 \times 10^{-3}}{0{,}10} = 4{,}8 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}

Tableau de la question 3 de l'exercice 22 :

		$C_8H_{10}N_4O_2(aq)$ +	$H_2O(\ell)$ $\rightleftharpoons$	$C_8H_{11}N_4O_2^+(aq)$ +	$HO^-(aq)$
État	**Avancement**	**Quantités de matière**			
initial	0	n	solvant	0	0
en cours	x	$n - x$	solvant	x	x
final	x_f	$n - x_f$	solvant	x_f	x_f

$[C_8H_{11}N_4O_2^+] = \frac{x_f}{V} = 4{,}0 \times 10^{-3}$ mol·L^{-1}.

3. Les concentrations (en mol·L^{-1}) des différentes espèces dans l'état final vérifient la relation :

$$K_a = \frac{[H_3O^+]\,[C_8H_{10}N_4O_2]}{[C_8H_{11}N_4O_2^+]}$$

A. N. : $\frac{10^{-11,6} \times 4{,}8 \times 10^{-2}}{4{,}0 \times 10^{-3}} = 3{,}0 \times 10^{-11}$

$pK_a = \log(3{,}0 \times 10^{11}) = 10{,}5$.

23. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. Le graphique présente les proportions des formes acide et basique en fonction du pH. La forme acide prédomine pour des pH inférieurs au pK_a du couple. En milieu très acide, la forme acide est donc très majoritaire, c'est le cas de l'espèce représentée par la courbe rouge.
Donc rouge : ClOH, bleu : ClO^-.

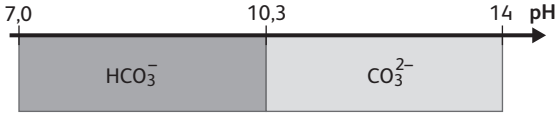
b. D'après la relation $pH = pK_a + \log\left(\frac{[ClO^-]}{[ClOH]}\right)$, les concentrations en ClOH et ClO^- sont égales lorsque le pH de la solution est égal au pK_a du couple. Sur le graphique, cette situation est repérée par l'intersection des courbes, dont l'abscisse correspond à pH = 7,5. Donc $pK_a = 7{,}5$.

c. Sur le graphique, on lit les proportions de chaque espèce pour un pH de 7,0. On trouve : 24 % de base ClO^- et 76 % d'acide ClOH.

24. ★ Titre alcalimétrique d'une eau

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a.



b. Un pH de 7,7 correspond au domaine où l'acide HCO_3^- est majoritaire devant la base CO_3^{2-}. De plus cette valeur est très éloignée du pK_a : l'acide HCO_3^- est donc ultra-majoritaire devant CO_3^{2-} : donc $[CO_3^{2-}] << [HCO_3^-]$.

c. En négligeant le terme $[CO_3^{2-}]$, le TAC s'écrit :

$$TAC = 100\,\frac{[HO^-]}{2} + \frac{[HCO_3^-]}{2}\,M_{CaCO_3}.$$

D'où $[HO] + [HCO_3] = 2\,\frac{TAC}{M_{CaCO_3}}$.

On en déduit :

$$[HCO_3^-] = 2\,\frac{TAC}{100\,M_{CaCO_3}}\,[HO^-] = 2\,\frac{TAC}{100\,M_{CaCO_3}} \times \frac{K_e}{[H_3O^+]}$$

$$= 2\,\frac{TAC}{100\,M_{CaCO_3}} \times \frac{K_e}{10^{-pH}}$$

A. N. : $[HCO_3^-] = 2 \times \frac{7{,}8}{100\,(40{,}1 + 12 + 16 + 3)} \times \frac{10^{-14}}{10^{-7{,}7}}$

$= 1{,}6 \times 10^{-3}$ mol·L^{-1}.

25. ★ Traitement des piscines

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. On utilise la relation :

$$K_a = \frac{[ClO^-]\,[H_3O^+]}{[HClO]} \times \frac{[ClO^-]}{[HClO]} = \frac{K_a}{[H_3O^+]} = \frac{10^{-pK_a}}{10^{-pH}} = 10^{pH-pK_a}$$

A. N. :
Pour pH = 7,0 : $\frac{[ClO^-]}{[HClO]} = 10^{7{,}0-7{,}5} = 0{,}32$.

Pour pH = 7,6 : $\frac{[ClO^-]}{[HClO]} = 10^{7{,}6-7{,}5} = 1{,}3$.

b. Le pK_a du rouge de phénol est de 8,0. La zone de pH 7-7,6 fait partie de la zone de virage de cet indicateur coloré : zone dans laquelle une petite variation de pH entraîne une variation de couleur importante.

c. La couleur prise par la solution est comparée à l'échelle de teinte. La couleur dépend du pH de l'eau de la piscine, mais également de la concentration en indicateur coloré. Pour pouvoir utiliser l'échelle de teinte, il faut que la concentration totale en indicateur coloré soit identique à celle utilisée pour réaliser l'échelle de teinte. C'est pourquoi la pastille de rouge de phénol doit être introduite dans un volume donné d'eau.

26. ★ Culture cellulaire

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

a. La régulation du pH est assurée par la solution tampon PBS (*buffer* = tampon en anglais). Le contrôle de la valeur du pH est assuré par la présence de l'indicateur coloré « rouge de phénol ».

b. L'indicateur coloré est un couple acide-base de $pK_a = 7{,}5$. Sa forme acide (majoritaire si le pH du milieu est inférieur à 7,5) est jaune et sa forme basique (majoritaire si le pH du milieu est supérieur à 7,5) est rouge.

c. La couleur rose du rouge de phénol correspond à sa zone de virage. Une contamination bactérienne se traduit par une couleur jaune, ce qui correspond à une acidification du milieu. La couleur rouge qui apparaît lors d'une attaque fongique montre que cette dernière s'accompagne d'une élévation du pH.

27. In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser.**

a. On utilise la relation : $pK_a + \log\frac{[CH_3CO_2^-]}{[CH_3CO_2H]}$

A. N. : $pH = 4{,}75 + \log\left(\frac{0{,}175}{0{,}125}\right) = 4{,}9$.

b. L'acide fort ajouté noté *HA* réagit avec la base $CH_3CO_2^-$ selon la réaction d'équation :
$CH_3CO_2^-$ (aq) + *HA* (aq) → CH_3CO_2H (aq) + A^- (aq).
Cette réaction entraîne la consommation de l'ion $CH_3CO_2^-$ et la formation de l'acide CH_3CO_2H. La grandeur $\log\frac{[CH_3CO_2^-]}{[CH_3CO_2H]}$ diminue donc et le pH diminue.
La base forte ajoutée, notée *B*, réagit avec l'acide CH_3CO_2H selon la réaction d'équation :
CH_3CO_2H (aq) + *B* (aq) → $CH_3CO_2^-$ (aq) + BH^+ (aq).

Cette réaction entraîne la consommation de l'acide CH_3CO_2H et la formation de l'ion $CH_3CO_2^-$. La grandeur $\log \frac{[CH_3CO_2^-]}{[CH_3CO_2H]}$ augmente donc et le pH augmente.

28. ★ Le bleu de thymol

> COMPÉTENCES : **Analyser, valider.**

La photographie montre que l'indicateur coloré peut présenter, en fonction du pH de la solution, trois teintes distinctes, séparées par des zones de virage entre deux couleurs :

pH	Couleur
1	rouge
2	orangée : zone de virage
3, 4, 5, 6, 7	jaune
7, 8, 9	verte : zone de virage
10, 11, 12	bleue

On en déduit que le bleu de thymol est un diacide dont les couples peuvent être notés H_2A/HA^- et HA^-/A^{2-}. H_2A est de couleur rouge, HA^- jaune et A^{2-} bleu.
On peut évaluer les pK_a de ces deux couples par les valeurs de pH correspondant au milieu des zones de virage : couple H_2A/HA^-, $pK_{a1} = 2{,}0 \pm 0{,}5$;
couple HA^-/A^{2-}, $pK_{a2} = 9 \pm 1$. Ces valeurs sont en accord avec les valeurs lues sur le document (1,9 et 9,2).

29. ★ Acide citrique

> COMPÉTENCES : **Analyser, connaître, réaliser.**

a. Couples : H_3A/H_2A^- ; H_2A^-/HA^{2-} ; HA^{2-}/A^{3-} (on obtient la formule de la base à partir de l'acide en retirant un atome d'hydrogène et en diminuant la charge d'une unité).
b. L'espèce la plus acide H_2A est majoritaire en milieu très acide. Celle qui lui succède lorsque le pH augmente est sa base conjuguée, etc.
D'où : courbe rouge : H_3A, verte ; H_2A^-, violette : HA^{2-}, bleue : A^{3-}.
c. $pH = pK_a + \log \frac{[A^-]}{[HA]}$ en notant HA l'acide et A^- sa base conjuguée.
d. Les concentrations sont égales lorsque le pH est égal au pK_a du couple.
e. L'intersection des courbes représentant les proportions d'un acide et de sa base conjuguée correspond à l'égalité de leurs concentrations. L'abscisse de l'intersection des courbes donne donc le pK_a du couple considéré.

Couple	H_3A/H_2A^-	H_2A^-/HA^{2-}	HA^{2-}/A^{3-}
pK_a	3,1	4,8	6,4
$K_a = 10^{-pKa}$	$7{,}9 \times 10^{-4}$	$1{,}6 \times 10^{-5}$	$4{,}0 \times 10^{-7}$

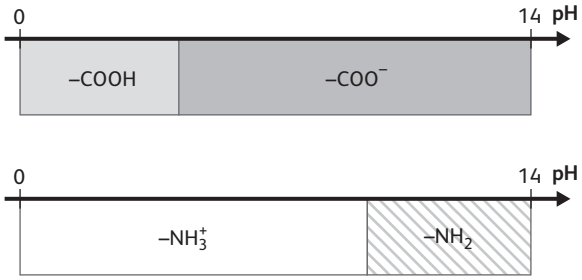
30. ★ Régulation du pH sanguin

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

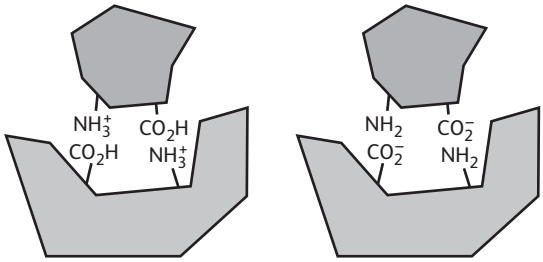
a. Le pH diminue lors de l'inspiration et augmente lors de l'expiration.
b. Les variations de la concentration en acide (CO_2(aq)) sont responsables de cette évolution.
c. $pH = pK_a + \log \frac{[HCO_3^-]}{[CO_2]}$.
d. Si l'on suppose que la concentration en ions HCO_3^- reste constante, lorsque $[CO_2]$ diminue lors de l'expiration, le rapport $\frac{[HCO_3^-]}{[CO_2]}$ augmente et le pH également. Inversement, lors de l'inspiration, ce rapport diminue et le pH aussi.
e. Il s'agit d'une réaction entre la base NH_3 et l'acide H_3O^+ :
$NH_3(aq) + H_3O^+(aq) \rightarrow NH_4^+(aq) + H_2O(\ell)$
f. Cette réaction conduit à la consommation d'ions H_3O^+ et donc à l'augmentation du $pH = -\log[H_3O^+]$ du sang.

31. ★ S'auto-évaluer

Deux groupes caractéristiques possédant des propriétés acido-basiques sont présents sur le substrat et sur l'enzyme. Ils appartiennent aux couples $-CO_2H/-CO_2^-$ et $-NH_3^+/-NH_2$. En général le pK_a d'un couple $-CO_2H/-CO_2^-$ est inférieur à celui d'un couple $-NH_3^+/-NH_2$. Les diagrammes de prédominance de ces deux couples sont :



En milieu très acide, les groupes carboxyle sont sous leur forme acide $-CO_2H$, et en milieu très basique sous leur forme basique $-CO_2^-$.
En milieu très basique, les groupes amino sont sous leur forme acide $-NH_3^+$, et en milieu très basique sous leur forme basique $-NH_2$.
On peut résumer ces remarques sur le schéma ci-dessous :



En milieu très acide **En milieu très basique**

Dans ces milieux, il ne peut plus y avoir d'attraction entre charges opposées puisque l'un des groupes est sous une forme neutre : la liaison entre l'enzyme et le substrat ne peut pas s'établir et l'enzyme ne peut pas jouer son rôle de catalyseur.

32. ★ Influence de la température

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. Les concentrations molaires des espèces de masse molaire M se déduisent des masses m ajoutées dans un échantillon de volume V d'eau :

$[HB^+] = \dfrac{\dfrac{m_{HBCl}}{M_{HBCl}}}{V}$ (car en se dissolvant 1 mol de $HBCl$ (s) fournit une mole de HB^+) et $[B] = \dfrac{\dfrac{m_B}{M_B}}{V}$.

A. N. : la formule de brute de B est $C_4H_{11}NO_3$ donc : $M_B = 121\ g{\cdot}mol^{-1}$.

La formule de brute de $HBCl$ est $C_4H_{12}NO_3Cl$ donc : $M_{HBCl} = 157{,}5\ g{\cdot}mol^{-1}$.

$[HB^+] = \dfrac{\dfrac{2{,}0}{157{,}5}}{1} = 1{,}27 \times 10^{-2}\ mol{\cdot}L^{-1}$;

$[B] = \dfrac{\dfrac{4{,}9}{121}}{1} = 4{,}05 \times 10^{2}\ mol{\cdot}L^{1}$.

b. $pH = pK_a + \log \dfrac{[B]}{[HB^+]}$

c. A. N. : à 20°C, $pH = 8{,}3 + \log \dfrac{4{,}05}{1{,}27} = 8{,}8$.

d. Le pK_a du couple diminue de 0,03 unité par élévation de 1 degré Celsius de la température.

Il vaut 8,3 à 20 °C ; il diminue de $0{,}03 \times (37 - 20) = 0{,}5$ à 37 °C et augmente de $0{,}03 \times (20 - 10) = 0{,}3$ à 10 °C.

D'où, à 37 °C : $pH = 8{,}8 - 0{,}5 = 8{,}3$.

À 10 °C : $pH = 8{,}8 + 0{,}3 = 9{,}1$.

33. ★ Encre sympathique

> COMPÉTENCES : **Analyser, communiquer.**

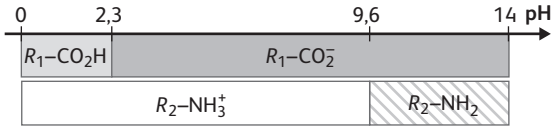
a. L'encre réalisée est une solution de la base HCO_3^-. Lorsqu'on écrit sur le papier avec la solution et que l'encre sèche (l'eau s'évapore), elle laisse des traces de cette base. Le jus de raisin est une solution dans laquelle les pigments colorés se comportent comme des indicateurs colorés (famille des anthocyanes). Sa couleur dépend du pH. Le jus de raisin a un pH initial donné (plutôt acide) dans lequel les pigments sont de couleur violette. En présence d'ion HCO_3^-, le pH est modifié, l'indicateur coloré change de forme acido-basique et donc de couleur.

b. La couleur du jus de raisin peut varier quand on lui ajoute certaines substances comme le bicarbonate de soude. Tu peux l'observer en ajoutant du bicarbonate de soude directement dans du jus de raisin : tu vois que la couleur du jus est modifiée. Quand tu écris sur la feuille, tu laisses des traces de bicarbonate de soude et quand tu peins ta feuille avec le jus de raisin, le jus change de couleur là où il rencontre les traces de bicarbonate de soude, ce qui révèle ton message qui apparaît d'une couleur différente du fond.

34. ★★ La charge des acides α–aminés

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

1. a.

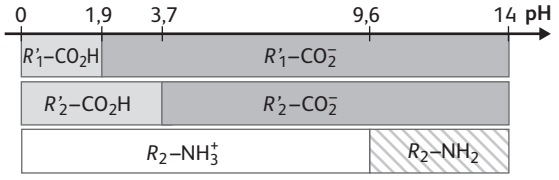


b. Dans l'intervalle [0 ; 2,3], le groupe carboxyle est neutre et le groupe amino possède une charge +I (en unité de charge élémentaire e). L'acide aminé possède donc une charge globale +I.

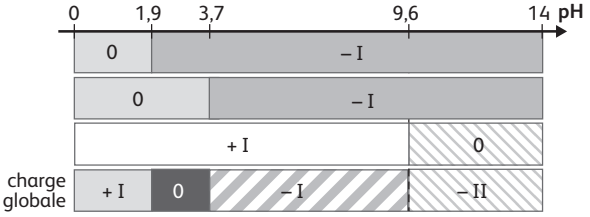
Dans l'intervalle [2,3 ; 9,6], le groupe carboxyle possède une charge –I et le groupe amino possède une charge +I. L'acide aminé possède donc une charge globale $–I + I = 0$.

Dans l'intervalle [9,6 ; 14], le groupe carboxyle possède une charge –I et le groupe amino est neutre. L'acide aminé possède donc une charge globale –I.

2. a.



b. Sur le diagramme ci-dessous, on a remplacé les différentes formes par leur charge. Sur la dernière ligne, on fait la somme des charges pour déterminer la charge globale de l'acide aspartique pour chacun des 4 intervalles de pH déterminés :



3. À un pH égal à 7,0 par exemple, la valine est neutre et l'acide aspartique présente une charge –I.

35. ★★ Acidose métabolique

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a. La valeur 7,4 du pH du sang est supérieure au pK_a du couple (6,1). La forme basique HCO_3^- prédomine donc devant la forme acide (CO_2, H_2O).

b. $pH = pK_a + \log \dfrac{[HCO_3^-]}{[CO_2]}$.

c. A. N. : $[CO_2] = 2{,}3 \times 10^{-4} \times 5{,}3 \times 10^{3} = 1{,}2\ mmol{\cdot}L^{-1}$.

La relation de la question **b.** peut s'écrire :

$K_a = \dfrac{[HCO_3^-]\,[H_3O^+]}{[CO_2]}$ $[HCO_3^-] = K_a = \dfrac{[CO_2]}{[H_3O^+]}$

A. N. : $[HCO_3^-] = 10^{-6{,}1} \times \dfrac{1{,}2}{10^{-7{,}4}} = 24\ mmol{\cdot}L^{-1}$.

d. Un défaut d'ions HCO_3^- entraîne une diminution du pH du sang comme le montre la relation **b.** Pour maintenir le pH constant, il faut également diminuer la concentration en CO_2 dissous. L'organisme tente d'obtenir cette diminution en amplifiant la respiration (chaque expiration expulse du CO_2 et diminue sa concentration sanguine).

36. ★★ Indicateur coloré à utiliser avec modération

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

1. a. La solution est rouge, ce qui correspond à la couleur de la forme acide majoritaire dans cette solution commerciale.

b. Un échantillon de solution de masse $m = 100$ g a un volume V d'environ 100 mL (si l'on assimile la solution à de l'eau de masse volumique 1 kg·L^{-1}). Il contient une masse d'hélianthine égale à 0,1 % $\times m$, soit une quantité $n = \dfrac{10^{-3} \times m}{M}$ d'hélianthine de masse molaire M.

D'où la concentration : $c = \dfrac{\dfrac{10^{-3}\, m}{M}}{V}$

A. N. : $\dfrac{\dfrac{10^{-3} \times 0{,}1}{327{,}34}}{0{,}1} = 3{,}1 \times 10^{-3}$ mol·L^{-1}.

2. La solution S_1 est une solution d'acide, la solution est donc acide, c'est-à-dire de pH inférieur à 7,0 à 25 °C.

La solution S_2 est une solution de base, la solution est donc basique, c'est-à-dire de pH supérieur à 7,0 à 25 °C.

3. Le pH de la solution S_2 est supérieur à 7 donc supérieur au pK_a = 3,5 de l'hélianthine. La forme acido-basique majoritaire de cet indicateur coloré sera donc la forme basique. On prévoit donc que la couleur de la solution S_2, à laquelle on aura ajouté quelques gouttes d'hélianthine, aura la couleur de sa base conjuguée, c'est-à-dire jaune.

4. a. La couleur du tube n°2 est jaune comme prévu.

b. La couleur rouge du tube n°1 montre que l'espèce majoritaire y est H*In* ce qui signifie que le pH de la solution est inférieur au pK_a du couples H*In*/*In*$^-$, c'est-à-dire inférieur à 3,5. Le pH du second tube de couleur jaune est quant à lui supérieur à 3,5, mais on sait d'après la question **3.** qu'il est même supérieur à 7.

c. Dans la solution S_2, la forme majoritaire de l'hélianthine est In^-.

5. a. Les tubes n°1 et 3 présentent la même couleur rouge mais l'intensité des teintes est différente. La couleur du tube n° 3 est plus intense parce que l'indicateur coloré y est plus concentré.

b. En revanche, entre les tubes n°2 et 4, il n'y a pas qu'une différence d'intensité : le tube n°2 est jaune pâle alors que le tube n°4 est orangé foncé. Le tube n°2 contient l'espèce In^- à faible concentration alors que le tube n°4 contient un mélange H*In* et In^- à plus grande concentration.

c. L'hélianthine introduite sous sa forme acide en grande quantité a réagi avec la base $ClCH_2CO_2^-$ présente dans la solution S_2 selon la réaction d'équation :

H*In* (aq) + $ClCH_2CO_2^-$ (aq) → In^- (aq) + $ClCH_2CO_2H$ (aq)

6. La réaction écrite en **5 c.** se produit également dans le tube n°2 mais la quantité de H*In* introduite est très faible et la réaction n'entraîne qu'une très petite modification de la concentration en ion $ClCH_2CO_2^-$.

Les indicateurs colorés sont des espèces acido-basiques, susceptibles de modifier le pH du milieu dans lequel elles sont introduites si leur quantité est trop importante. Il faut donc les utiliser avec modération.

37. Formulation de l'aspirine

> COMPÉTENCES : **Analyser, s'approprier, communiquer.**

L'aspirine est un couple acide faible (l'acide salicylique H*A*)/base faible (l'ion salicylate A^-) de pK_a = 3,5. L'acide est liposoluble et faiblement soluble dans l'eau, la base est hydrosoluble et faiblement soluble dans les lipides.

L'aspirine ingérée par voie orale peut être absorbée dans le sang au niveau de l'estomac ou au niveau de l'intestin. L'absorption est plus rapide quand elle a lieu au niveau de l'estomac, l'effet est retardé quand elle a lieu dans l'intestin.

L'effet secondaire principal de l'aspirine est une toxicité gastrique : en présence d'aspirine, les parois stomacales sont moins protégées contre l'acidité de l'estomac.

Le milieu stomacal est très acide (pH égal à 2). La muqueuse gastrique est protégée de cette acidité par les prostaglandines. Or, l'aspirine inhibe la synthèse de ces prostaglandines en se dissolvant dans les graisses de la muqueuse gastrique. La toxicité de l'aspirine est donc liée à sa possible dissolution dans les parois stomacales.

Dans le milieu stomacal de pH égal à 2 et donc inférieur au pK_a du couple H*A*/A^-, c'est la forme acide, toxique pour les muqueuses gastriques qui est majoritaire.

Les formulations proposées exploitent les propriétés acido-basiques de l'aspirine.

– L'aspirine peut être ingérée dissoute dans un verre d'eau. La formé ingérée est alors basique. C'est le cas de l'ASPEGIC qui contient l'ion acétylsalicylate.

La solubilisation dans l'eau peut être obtenue par réaction acido-basique, c'est le cas de la formulation effervescente qui contient l'acide acétylsalicylique H*A* et la base hydrogénocarbonate. La solubilisation de l'aspirine repose alors sur la formation de l'ion acétylsalicylate selon la réaction d'équation :

H*A* + HCO_3^- → A^- + (CO_2, H_2O). Le dioxyde de carbone formé n'est pas suffisamment soluble dans l'eau : du dioxyde de carbone gazeux se forme, d'où l'aspect « effervescent ».

Cette formulation permet une bonne dissolution de l'aspirine, ce qui favorise son absorption plus rapide au niveau de l'estomac. L'effet est rapide mais il présente l'inconvénient de présenter la toxicité gastrique évoquée précédemment.

– L'aspirine peut être avalée en comprimés gastro–résistants (ASPIRINE pH8TM). Le principe actif est dissimulé sous un enrobage qui résiste à l'acidité de l'estomac et traverse l'estomac sans être dissous. Le comprimé se dissout au niveau de l'intestin, à un pH de 8 supérieur au pK_a du couple H*A*/A^-. La forme majoritaire est alors

l'ion salicylate A^-. Cette formulation évite la toxicité gastrique de l'aspirine mais l'effet thérapeutique est retardé. Les documents ne permettent pas de savoir si la forme basique est bien soluble dans les parois de l'intestin, mais on peut supposer que ces parois sont lipidiques et que l'absorption est alors difficile puisque la forme majoritaire n'est pas liposoluble.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

38. *HELICOBACTER PYLORI*, UNE BACTÉRIE QUI SURVIT EN MILIEU TRÈS ACIDE

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

1. a. Il s'agit d'une réaction acido-basique :
$NH_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftharpoons NH_4^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$ (flèche $\rightarrow$ acceptée aussi puisqu'à ce stade on ne sait pas s'il s'agit d'une base faible ou forte).
Voir le tableau d'avancement de la réaction en bas de page.
b. La valeur du pH permet de déterminer $[H_3O^+] = 10^{-pH}$ puis, grâce à la relation $K_e = [H_3O^+] \times [HO^-]$ (avec les concentrations en mol·L^{-1}) :

$$[HO] = \frac{K_e}{[H_3O^+]} = \frac{K_e}{10^{-pH}}$$

$$\text{A. N. : } [HO^-] = \frac{10^{-14}}{10^{-10,8}} = 6,3 \times 10^{-4} \text{ mol·L}^{-1}.$$

D'après le tableau d'avancement, la quantité d'ions hydroxyde dans la solution, n_{HO^-}, est égale à l'avancement final.
Or $n_{HO} = [HO^-] \times V$, donc $x_f = [HO^-] \times V$
A.N. : $x_f = 6,3 \times 10^{-4} \times 0,2 = 1,3 \times 10^{-4}$ mol.
c. L'avancement maximal de la réaction est égal à $n = 5,0 \times 10^{-3}$ mol. On constate que $x_f < n$. La réaction n'est donc pas totale, ce qui signifie que l'ammoniac est une base faible.
d. Dans l'état final, les concentrations en ammoniac NH_3 et en ions ammonium NH_4^+ sont liées par :

$$K_a = \frac{[H_3O^+]\,[NH_3]}{[NH_4^+]}.$$

Or, d'après le tableau d'avancement, $n_{HO^-} = n_{NH_4^+}$, donc $[NH_4^+] = [HO^-]$ et :

$$K_a = \frac{[H_3O^+]\,[NH_3]}{[HO^-]} = 10^{-pH}\,\frac{\frac{nx_f}{V}}{\frac{x_f}{V}} = 10^{-pH} \times \frac{n - x_f}{x_f}$$

$$\text{A.N. : } K_a = 10^{-10,8}\,\frac{5,0 \times 10^{-3} \times 1,3 \times 10^{-3}}{1,3 \times 10^4} = 5,9 \times 10^{-10}$$

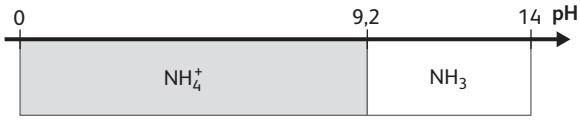
D'où $pK_a = -\log(K_a) = 9,2$. Cela correspond bien à la valeur donnée dans l'énoncé.

$$NH_2\text{–}CO\text{–}NH_2\,(aq) + H_2O(\ell) \rightarrow 2\,NH_3\,(aq) + CO_2\,(aq)$$

2. On ajuste les nombres stœchiométriques pour que l'équation soit équilibrée :

$$NH_2\text{–}CO\text{–}NH_2\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow 2\,NH_3\,(aq) + CO_2\,(aq)$$

3. a. Le pH d'une solution d'acide fort de concentration initiale c se calcule grâce à : $pH = -\log(c)$.
A. N. : $pH = -\log(1,0 \times 10^{-2}) = 2,0$.
b. Pour répondre à cette question, on s'appuie sur un diagramme de prédominance :



À un pH de 2, l'espèce majoritaire est NH_4^+.
c. L'ammoniac produit par la bactérie réagit avec les ions H_3O^+, ce qui entraîne une diminution de leur concentration au voisinage de la bactérie, et donc une augmentation du pH dans son environnement proche, c'est ce qui permet à la bactérie de survivre dans ce milieu très acide.

39. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Électrophorèse

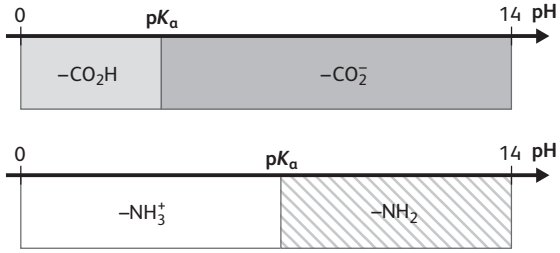
> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser.**

D'après le document 1, le sens de migration de l'acide α–aminé dépend de sa charge. Cette charge est liée à la présence de groupes caractéristiques carboxyle ou amino possédant des propriétés acido-basiques dont la forme prédomiante dépend du pH.
Le papier est imbibé d'une solution tampon qui impose une valeur de pH constante pendant la migration.
Connaissant le pK_a des couples acido-basiques présents pour chaque acide α-aminé, on peut déterminer la forme prédominante de chaque groupe pour toute valeur de pH à l'aide d'un diagramme de prédominance et en déduire le signe global de l'acide α–aminé.

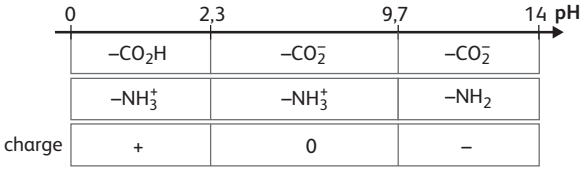
Tableau de la question 1.a. de l'exercice 38 :

		$NH_3\,(aq)$ +	$H_2O\,(\ell)$ $\rightleftharpoons$	$NH_4^+(aq)$ +	$HO^-(aq)$
État	**Avancement**	**Quantités de matière (mol)**			
initial	0	n	solvant	0	0
en cours	x	$n - x$	solvant	x	x
final	x_f	$n - x_f$	solvant	x_f	x_f

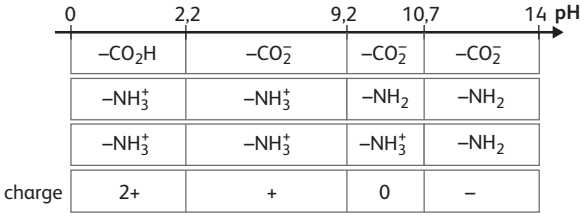
On utilisera la propriété suivante :
– pH > pK_a : la base faible prédomine ;
– pH < pK_a : l'acide faible prédomine.



Pour l'alanine :



Pour la lysine :



Pour que les deux acides α–aminés soient bien séparés, il faut choisir un pH pour lequel ils possèdent tous les deux une charge différente, de manière à ce qu'ils migrent différemment.
À un pH de 7 par exemple, la lysine (chargée +1) migre vers la borne – et l'alanine, neutre, ne migre pas.

40. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

Acidification des océans

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, communiquer, connaître.**

1. Ces organismes possèdent une coquille ou un squelette possédant du calcium sous la forme de carbonate de calcium. La formation de la coquille ou du squelette est donc une calcification selon la définition du document 2.

2. D'après le document 3, le dioxyde de carbone réagit avec l'eau pour former un acide (l'acide carbonique). La réaction de cet acide faible (doubles flèches traduisant une réaction équilibrée) avec l'eau conduit à la formation d'ions H_3O^+ (notés H^+ dans le document) et donc à l'augmentation de leur concentration entraînant une diminution du pH = $-\log[H_3O^+]$ avec $[H_3O^+]$ en $mol \cdot L^{-1}$.

3. La destruction des coquilles en carbonate de calcium peut s'expliquer par la succession des réactions suivantes :

1) $CO_2(g) \rightleftharpoons CO_2(aq)$

2) $CO_2(aq) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons H_2CO_3(aq)$

3) $H_2CO_3(aq) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons HCO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$

4) $CaCO_3(s) + H_3O^+(aq) \rightleftharpoons HCO_3^-(aq) + Ca^{2+} + H_2O(\ell)$

4. D'après le document 1, l'augmentation du taux de dioxyde de carbone atmosphérique s'accompagne de l'augmentation de pCO_2 de l'eau de mer, c'est-à-dire d'une augmentation de la concentration de CO_2 dissous dans l'eau. Cette augmentation entraîne une acidification (diminution de pH) qui s'explique par les réactions d'équations 1) à 3) (question **3**). Les coraux, organismes calcifiants (document 2, question **1**), possèdent un squelette en carbonate de calcium $CaCO_3(s)$ qui est détruit par les ions H_3O^+ selon la réaction d'équation 4) (question **3**). Une augmentation du taux de dioxyde de carbone atmosphérique entraîne donc la destruction de ce squelette par acidification de l'eau de mer, nuisant au développement des coraux.

41. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Mesurer une constante d'acidité

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

CHAPITRE 17

COMPRENDRE

Transferts thermiques d'énergie

> Manuel pages 384 à 405

Choix pédagogiques

Ce chapitre introduit le thème « Énergie, matière et rayonnement » de la deuxième partie du programme « Comprendre – Lois et modèles ».
Pour cela, une première activité documentaire sur le microscope à force atomique permet aux élèves d'appréhender une technologie actuelle d'observation à l'échelle atomique et moléculaire. Ces technologies permettent de remonter aux dimensions et à la structure de la matière à ce niveau d'organisation.
Une seconde activité sur les étoiles à neutrons permet de saisir le changement d'ordre de grandeur lors du passage du macroscopique au microscopique, notamment sur le plan du dénombrement (constante d'Avogadro), ou de la taille des objets.
Une activité expérimentale propose de mesurer la capacité thermique massique de l'eau par calorimétrie. Conforme aux ECE actuelles, en accord avec les compétences de la démarche scientifique, elle amène l'élève à effectuer un bilan énergétique dans un système calorifugée, à réaliser la manipulation dont il aura établi le protocole, et à l'aide d'une représentation graphique à évaluer sa mesure expérimentale et à la comparer à une valeur tabulée.
Puis, dans une dernière activité documentaire, l'effet de serre est étudié en effectuant un bilan énergétique de l'atmosphère, ce qui permet de faire un lien avec la thématique sur les enjeux énergétiques de la troisième partie « Agir – Défis du XXIe siècle ».
Le cours découlant de ces activités reprend les notions précédentes en mettant notamment en évidence l'aspect nécessairement statistique de notre connaissance des systèmes formés d'un grand nombre d'entités microscopiques. Dans l'étude des transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques, des notions de base de la thermodynamique (énergie interne, transferts thermiques, travail, capacité thermique), première étape vers l'étude future de ses principes, sont également traitées. À cette occasion, certains éléments méthodologiques de la thermodynamique sont alors mis en place : définition du système étudié, identification de la nature et du sens des transferts d'énergie, analyse critique des résultats obtenus et mise en perspective avec des dispositifs réels. Cependant, conformément aux repères pour la formation, les transferts d'énergie ne sont pas algébrisés dans les exercices d'application.
Enfin, la diversité des transferts thermiques permet d'évoquer l'irréversibilité des phénomènes liée en particulier aux processus diffusifs, et d'aborder des aspects de la vie courante tenant aux préoccupations énergétiques. Ainsi, dans les cours et dans les exercices, les bilans d'énergie sont appliqués au domaine de l'habitat (problématique du chauffage d'une habitation, machines thermiques, installations énergétiques…), ou bien encore celui de la production d'énergie.

OUVERTURE DE CHAPITRE

La thermographie infrarouge permet de cartographier la température de surface d'un bâtiment en la reliant au rayonnement infrarouge émis.

Pourquoi est-il intéressant d'analyser des images obtenues avec des caméras infrarouges ?

Dans un souci d'économie d'énergie, on peut recourir à la thermographie infrarouge afin de quantifier les pertes thermiques d'un bâtiment.
La description de la photographie doit permettre aux élèves d'évoquer la problématique des transferts thermiques et du coût (environnemental et économique) généré par le chauffage des habitations. Les élèves réfléchiront ensuite aux différents moyens permettant de limiter les transferts thermiques entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Le microscope à force atomique

Commentaires

Les documents proposés décrivent le principe de fonctionnement d'un microscope à force atomique.
Cette activité permet aux élèves de s'interroger sur l'ordre de grandeur d'un atome. Une interrogation sur les limites de la microscopie optique et la nécessité d'utiliser d'autres techniques pour « visualiser » des atomes y est également suggérée.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. Le système de balayage d'un microscope à force atomique permet le déplacement du support d'un échantillon (ou de la pointe) afin de sonder **toute la surface** d'un échantillon grâce à la pointe qui se soulève plus ou moins suivant la topographie (relief) de l'échantillon, « reproduisant [ainsi] les irrégularités de la surface ».

Le rôle du laser et du photodétecteur est de **déterminer les déplacements (hauteur et position) de la pointe**, ce qui permet à l'ordinateur, couplé avec ce matériel, de reconstituer une image en trois dimensions de la surface de l'échantillon.

b. La taille de la pointe est le principal élément qui limite la résolution du microscope à force atomique. Elle doit être le plus effilée possible afin d'être idéalement « un cône se terminant par quelques atomes ».

RÉALISER

2. a. En utilisant l'échelle de l'image du document 2, on constate qu'il s'agit d'un carré de 2,4 nm de côté. Sa surface S est donc égale à :

$S = 2{,}4 \times 2{,}4 = 5{,}8\ \text{nm}^2 = 5{,}8 \times 10^{-18}\ \text{m}^2$.

b. On peut compter sur le document 2 environ **130 atomes de tungstène**, chaque atome étant représenté par une bosse. On peut donc en conclure que le nombre n d'atomes de tungstène par m^2 est égal à :

$n = \dfrac{130}{5{,}8 \times 10^{-18}\ \text{m}^2} = 2{,}24 \times 10^{19}\ \text{m}^{-2}$ soit de l'ordre de grandeur $10^{19}\ \text{m}^{-2}$, c'est à dire qu'il faut 10^{19} atomes pour couvrir un mètre carré.

c. Si on suppose qu'un atome de tungstène est une sphère de rayon R, on peut considérer qu'un atome occupe la surface $A = \pi R^2$ sur le document 2.

De plus, si en première approximation on suppose que les atomes occupent toute la surface considérée, on peut en conclure que : $n \times A = 1\ \text{m}^2$.

Ainsi $n\pi R^2 = 1 \Rightarrow R = \dfrac{1}{\sqrt{\pi n}}$.

Un calcul en ordre de grandeur donne $R = 10^{-10}$ m. Le rayon atomique d'un atome de tungstène est égal à $1{,}35 \times 10^{-10}$ m. L'ordre de grandeur est donc correct.

VALIDER

3. L'idée de « voir » des atomes sous-entend de pouvoir faire l'image d'un atome avec de la lumière visible pour l'œil, comme on le fait avec un microscope optique. Or la résolution (taille du plus petit détail observable) avec la lumière est limitée par la diffraction. Comme, dans le visible, la longueur d'onde est comprise entre 10^{-7} et 10^{-6} m (en ordres de grandeur), le plus petit détail observable ne peut être plus petit que 10^{-7} m, soit mille fois plus gros qu'un atome. Construire une image optique d'un atome est donc impossible. D'où l'emploi d'autres techniques pour les appréhender, comme dans le cas du microscope à force atomique.

La **résolution maximale d'un microscope à force atomique** dépend de la taille de sa pointe, idéalement « un cône se terminant par quelques atomes ». Aujourd'hui, la résolution maximale d'un microscope à force atomique est de l'ordre de 10^{-1} nm = **10^{-10} m**, ce qui correspond à la dimension d'un atome.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Les étoiles à neutrons

Commentaires

Au travers des documents décrivant les différentes phases de la vie des étoiles supergéantes, cette activité permet d'étudier les ordres de grandeur associés aux phénomènes stellaires spectaculaires qui en découlent.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Les valeurs numériques concernant la masse et la taille d'une étoile supergéante dans différentes phases de sa vie sont :

	Masse de l'étoile	Taille de l'étoile
Étoile supergéante	masse supérieure à 8 masses solaires (supérieure à 10^{31} kg)	rayon de l'étoile de l'ordre de 100 rayons solaires (de l'ordre de 10^{8} km)
Explosion de l'étoile supergéante : supernova		
Étoile à neutrons	masse de l'ordre de 1,5 masse solaire (de l'ordre de 10^{30} kg)	rayon de l'étoile de l'ordre de 10^{1} km

ANALYSER

2. a. L'ordre de grandeur de la taille d'un noyau atomique est **10^{-15} m** alors que l'ordre de grandeur de la taille du « noyau » résiduel d'une étoile supergéante, appelé étoile à neutrons, est **10^{4} m**. Le « noyau » résiduel est donc **10^{19} fois plus grand** qu'un noyau atomique (soit 10 milliards de milliards de fois plus grand).

b. La masse d'un neutron est égale à $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg. Son ordre de grandeur est donc **10^{-27}** kg. Celle d'une étoile à neutrons est de **10^{30}** kg.

RÉALISER

3. a. Le rapport des deux nombres précédents permet d'évaluer le nombre N de neutrons dans l'étoile :

$N = \dfrac{10^{30}}{10^{-27}} = 10^{57}$. Ce nombre est gigantesque.

b. L'ordre de grandeur V du volume d'une étoile à neutrons, considérée comme sphérique et de rayon R, est égal à $V = \dfrac{4}{3}\pi R^3 \approx 10^{12}$ m.

La masse volumique donne donc en ordre de grandeur :

$\rho = \dfrac{m}{V} \approx \dfrac{10^{30}}{10^{12}} = 10^{18}\ \text{kg}\cdot\text{m}^3$.

La masse volumique de l'eau valant $\rho_{eau} = 10^3\ kg{\cdot}m^3$.

D'où la densité $d = \dfrac{\rho}{\rho_{eau}} \approx \dfrac{10^{18}}{10^3} \approx 10^{15}$.

D'après la dernière phrase du texte, cette densité extraordinaire « équivaut au volume d'une cuillère à café ayant pour masse plusieurs centaines de millions de tonnes ». Une cuillère à café pouvant accueillir environ $V_{cuillère} = 5\ mL = 5\ cm^3 = 5 \times 10^{-6}\ m^3$ si on y place une masse d'une centaine de millions de tonnes (10^{11} kg), la masse volumique vaudra $\rho = \dfrac{m}{V_{cuillère}} = \dfrac{10^{11}\ kg}{5 \times 10^{-6}\ m^3} = 10^{18}$ $kg{\cdot}m^{-3}$ et l'ordre de grandeur de la densité 10^{15}.

VALIDER

4. Les densités calculées dans la question précédente montrent la cohérence des phrases du document.

3. DÉMARCHE D'INVESTIGATION

Détermination de la capacité thermique massique de l'eau

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

L'effet de serre

Commentaires

Les documents de cette activité documentaire présentent le phénomène de l'effet de serre sur Terre et ils décrivent plus précisément un bilan de puissances simplifié associé à l'effet de serre. L'étude de ces documents permet de réaliser notamment les bilans énergétiques de trois systèmes différents : la Terre, son atmosphère et l'espace. Enfin, la dernière question demande une recherche documentaire sur l'influence des différents gaz à effet de serre et sur leur réduction nécessaire dans l'atmosphère.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. Deux types de transfert d'énergie sont décrits dans le document 1 : le **rayonnement** et la **convection**.

b. Les rayonnements concernés par les échanges d'énergie avec l'atmosphère sont les rayonnements **infrarouges**.

RÉALISER

2. a. D'après le document 2, la puissance surfacique du rayonnement reçu par la Terre vaut :

$$\mathcal{P}_1 = 160\ W{\cdot}m^{-2}$$

Et la puissance surfacique que recevrait la Terre en l'absence d'atmosphère est égale à :

$$\mathcal{P}_2 = 160 + 80 + 100 = 340\ W{\cdot}m^{-2}$$

Le rapport entre ces deux puissances est égal à :

$$\frac{\mathcal{P}_1}{\mathcal{P}_2} = \frac{160}{340} = 47{,}1\ \%$$

Cela correspond aux informations données dans le document 1 : « environ 50 % du rayonnement solaire traverse l'atmosphère terrestre et parvient jusqu'à la surface de la Terre ».

b. Schéma représentant les transferts d'énergie entre la Terre et les deux autres systèmes (l'atmosphère et l'espace), *les valeurs numériques sont des puissances surfaciques en* $W{\cdot}m^{-2}$:

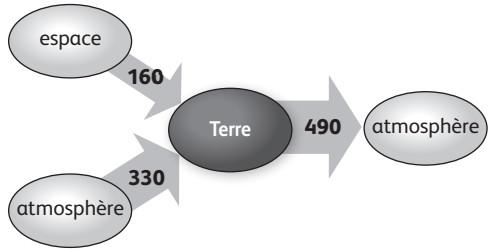


Schéma représentant les transferts d'énergie entre l'atmosphère et les deux autres systèmes (la Terre et l'espace), *les valeurs numériques sont des puissances surfaciques en* $W{\cdot}m^{-2}$:

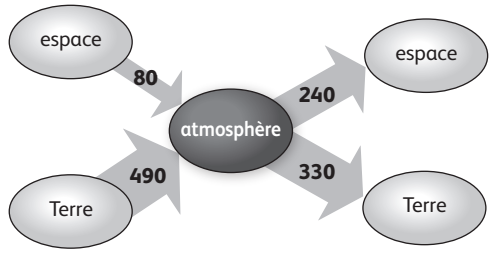
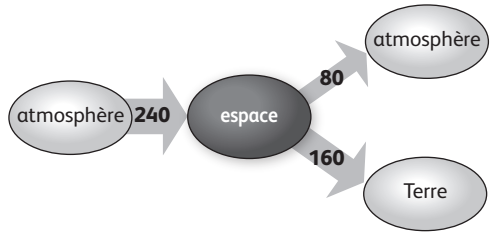


Schéma représentant les transferts d'énergie entre l'espace et les deux autres systèmes (la Terre et l'atmosphère), *les valeurs numériques sont des puissances surfaciques en* $W{\cdot}m^{-2}$:

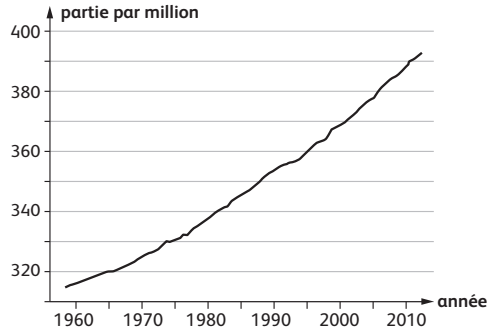


c. Pour chaque système, la somme des transferts d'énergie (ou de puissances surfaciques) émis est bien **égale** à la somme des transferts d'énergie (ou de puissances surfaciques) reçus.

COMMUNIQUER

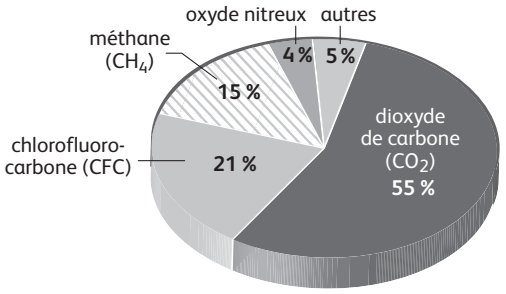
3. a. L'effet de serre n'est pas un phénomène récent. Il n'est pas du tout néfaste à la vie sur Terre : il est même indispensable à la survie de la plupart des espèces vivant sur Terre car, sans effet de serre, la température moyenne à la surface de la Terre serait de –18 °C.

b. Les gaz à effet de serre cités dans le document 1 sont :
– **la vapeur d'eau H_2O**, qui est le principal gaz à effet de serre naturel. Elle joue un rôle complexe dans le réchauffement climatique car son cycle et ses réponses sont très rapides (quelques semaines au plus) en fonction des conditions météorologiques, contrairement aux autres gaz à effet de serre dont la durée de vie et l'inertie sont beaucoup plus importantes. Les activités humaines influencent peu sa concentration dans l'atmosphère. C'est la température de l'atmosphère qui détermine sa présence. Ainsi, en réchauffant l'atmosphère, nos activités pourraient indirectement augmenter la quantité de vapeur d'eau dans l'air, augmentant d'autant plus l'effet de serre : on appelle ceci une rétroaction positive.
– **le dioxyde de carbone CO_2**, qui représente environ 55 % du pouvoir radiatif global des gaz à effet de serre. Ce gaz a contribué à l'augmentation de l'effet de serre à hauteur de 90 % en 5 ans (données de 2008). Il provient principalement des émissions des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) Il est également issu de certains procédés industriels, de la déforestation et de l'agriculture intensive. Les secteurs les plus émetteurs sont l'industrie, la production énergétique et les transports. La consommation des ménages (cuisson, chauffage, électricité) contribue aussi significativement aux émissions de dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone est également émis par l'activité naturelle de notre planète : éruptions volcaniques, respiration des plantes et des animaux.
Remarque : les concentrations en dioxyde de carbone ont été comprises entre 190 ppm (ères glaciaires) et 300 ppm (périodes chaudes). Les mesures effectuées à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaï) et l'étude des bulles d'air emprisonnées dans les calottes polaires, montrent que la concentration est passée d'environ 280 ppm dans les années 1850 (début de la civilisation industrielle) à plus de 387 ppm en 2009 : le taux de dioxyde de carbone atmosphérique est plus élevé aujourd'hui qu'il ne l'a jamais été au cours des deux derniers millions d'années. À titre de comparaison, il avait fallu plus de 5 000 ans pour que la concentration en dioxyde de carbone augmente de seulement 80 ppm à la fin du dernier âge glaciaire (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat GIEC, 2007). Notons qu'il existe une oscillation annuelle normale des concentrations de dioxyde de carbone qui s'explique par le cycle végétatif.



Concentrations moyennes mensuelles du CO_2 relevées à l'observatoire de Mauna Loa – Hawaï © NOAA ; 04/2012.

– **le méthane CH_4, l'ozone O_3, les oxydes d'azote** (appelés aussi oxydes nitreux). Avec le dioxyde de carbone et les CFC, ce sont les autres principaux gaz qui contribuent à l'effet de serre.



Part des différents gaz à effet de serre : dans l'effet de serre additionnel ou d'origine anthropique, le dioxyde de carbone contribue majoritairement à l'effet de serre. Source : d'après GIEC 2001.

Ainsi, la limitation des gaz à effet de serre est aujourd'hui une des priorités mondiales car l'augmentation trop rapide de ces gaz dans l'atmosphère entraîne une hausse brutale de la température moyenne sur Terre qui bouleverse les écosystèmes existants et qui va entraîner la migration d'une grande partie de la population humaine.

EXERCICES Appliquer le cours

Du microscopique au macroscopique (§1 du cours)

14. Visualiser des entités microscopiques
a. Microscope à effet tunnel.
b. Microscope à force atomique.

15. Évaluer des ordres de grandeurs
Le nombre d'entités dans 200 g de paraffine est :

$$N = \frac{m \times N_A}{M} = \frac{200 \times 6{,}02 \times 10^{23}}{320} = 3{,}76 \times 10^{23}$$

L'ordre de grandeur est 10^{23} entités.
Le nombre d'entités dans 2 L d'eau liquide est :

$$N = \frac{\rho \times V \times N_A}{M} = \frac{1{,}0 \times 2 \times 10^3 \times 6{,}02 \times 10^{23}}{18} = 6{,}7 \times 10^{25}.$$

L'ordre de grandeur est 10^{26} entités.

Énergie interne d'un système (§2 du cours)

16. Utiliser ses connaissances
a. Le type de transfert thermique prédominant dans le cuivre métallique est la conduction.
b. En prenant garde à la concordance des unités, la variation d'énergie interne du morceau de cuivre est égale à :
$\Delta \mathcal{U} = m \times c_m \times (T_c - T_a) = 0{,}450 \times 386 \times 70 = 1{,}2 \times 10^4$ J.

17. Comparer un résultat

a. Pour chauffer l'eau du bain de 15 °C à 37 °C, il faut lui apporter un transfert thermique égal à sa variation d'énergie interne.

On tient compte de la conversion :

$1\ m^3 = (1\ m)^3 = (10\ dm)^3 = 10^3\ dm^3 = 10^3\ L$ pour déduire $m = 200\ kg$.

On applique la relation adaptée aux systèmes condensés pour en déduire :

$Q = \Delta\mathcal{U} = m \times c_{eau} \times \Delta T = 200 \times 4\,180 \times 22 = 1{,}8 \times 10^7$ J.

b. La température de l'eau a augmenté donc l'énergie interne aussi : l'agitation des molécules d'eau augmente tout comme leur énergie cinétique.

c. L'énergie délivrée par une ampoule est égale à :

$\mathcal{E} = \mathcal{P} \times \Delta t$. Ainsi une ampoule peut briller avec une telle énergie pendant une durée égale à :

$$\Delta t = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{P}} = \frac{1{,}8 \times 10^7}{60} = 3{,}0 \times 10^5\ s = 3{,}5\ \text{jours}.$$

Conclusion : pour faire des économies d'énergie, il faut éteindre les éclairages non nécessaires, mais il est encore plus important de limiter le nombre de bain et de chauffer moins d'eau !

Transferts thermiques (§3 du cours)

18. Interpréter des transferts thermiques

a. Les deux systèmes sont : {radiateur} et {air de la chambre}.

b. Le transfert thermique se fait essentiellement par convection au sein de l'air. L'énergie dissipée par le radiateur peut avoir pour origine la conduction s'il est électrique.

c. Le transfert thermique se fait spontanément de la partie la plus chaude à la partie la plus froide, soit du {radiateur} vers l'{air de la chambre}.

19. Effectuer un raisonnement scientifique

Rosa a raison, les glaçons vont se réchauffer moins vite si on les met dans une écharpe en laine qui joue le rôle d'isolant thermique : en effet, la résistance thermique élevée de l'écharpe en laine permet de diminuer le flux thermique entre l'air et les glaçons et donc d'augmenter la durée de fonte de ces glaçons.

Flux thermiques et bilan d'énergie (§4 du cours)

20. Exploiter la relation du flux thermique

a. On applique la formule pour le verre :

$$\Phi = \frac{\lambda \times S}{e} \times \Delta T = \frac{1{,}2 \times 2{,}0}{5{,}0 \times 10^{-3}} \times 20 = 9{,}5 \times 10^3\ W$$

b. Le même calcul pour le béton donne :

$$\Phi = \frac{\lambda \times S}{e} \times \Delta T = \frac{1{,}4 \times 20}{2{,}0 \times 10^{-2}} \times 20 = 2{,}8 \times 10^4\ W$$

21. Effectuer un bilan énergétique

a. Un système fermé est un système n'échange pas de matière avec l'extérieur. Ce système est condensé si la matière étudiée est liquide ou solide.

b. La variation de l'énergie totale d'un système $\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_m + \Delta\mathcal{U}$ est égale à la somme des travaux échangés avec l'extérieur autres que ceux des forces conservatives $\mathcal{W}$ et du transfert thermique Q échangé avec le milieu extérieur :

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_m + \Delta\mathcal{U} = Q + \mathcal{W}$$

avec toutes les grandeurs exprimées en joules (J).

c. La variation d'énergie interne de ce système est égale à :

$$\Delta\mathcal{U} = m \times c \times \Delta T$$

De plus, si on considère que ce système est immobile :

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{U} = Q + \mathcal{W}$$

d. Si le système est fermé :

$$\Delta\mathcal{U} = Q + \mathcal{W} = 0$$

Alors pour un système condensé, on en déduit ;

$$\Delta T = \frac{\Delta\mathcal{U}}{m \times c} = 0$$

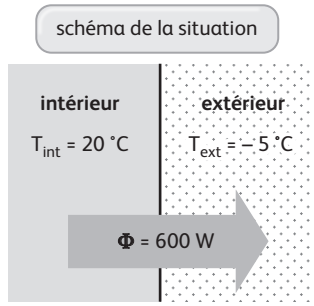
Si le système n'échange plus d'énergie, ni par transfert thermique, ni par travail des forces non conservatives avec l'extérieur, sa température est constante. Le système est à l'équilibre thermique.

EXERCICES S'entraîner

22. Exercice résolu dans le manuel

23. Application de l'exercice résolu

1.



2. On calcule la résistance thermique :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{20 - (-5)}{600} = 4{,}2 \times 10^{-2}\ K \cdot W^{-1}$$

24. Exercice résolu dans le manuel

25. Application de l'exercice résolu

1. On isole $\mathcal{W}_e$ dans la formule de l'énoncé :

$\mathcal{W}_e = Q_c - Q_f = 13{,}9 - 11{,}8 = 2{,}1$ kJ.

2. Pour un réfrigérateur, afin de mieux refroidir l'intérieur, on veut optimiser le transfert thermique issu de la source froide Q_f. L'énergie électrique consommée est $\mathcal{W}_e$. On en déduit le coefficient de performance :

$$\eta = \frac{Q_f}{\mathcal{W}_e} = \frac{11{,}8}{2{,}1} = 5{,}6.$$

Encore une fois, ce coefficient est supérieur à 1.

26. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Si on ne tient pas compte des frottements, l'énergie totale du système {bille} est conservée : $\mathscr{E}_i = \mathscr{E}_f$ et son énergie interne $\mathscr{U}$ est constante au cours du temps, par conséquent $\mathscr{E}_m$ aussi.

Comme $\mathscr{E}_{mi} = \mathscr{E}_{ci} + \mathscr{E}_{ppi} = \frac{1}{2} mv_0^2$ (car la bille est à une altitude nulle à l'instant initial) et $\mathscr{E}_{mf} = \mathscr{E}_{cf}\ mgh_0$ (car la vitesse de la bille est nulle lorsque la bille a atteint son altitude maximale), on trouve que :

$$\frac{1}{2} mv_0^2 = mgh_0 \Rightarrow h_0 = \frac{v_0^2}{2g}$$

Remarque : en négligeant les frottements, on peut directement affirmer que l'énergie mécanique du système $\mathscr{E}_m = \mathscr{E}_c + \mathscr{E}_{pp}$ est conservée.

b. Si on tient compte des frottements, l'énergie totale du système {bille} n'est pas conservée : $\mathscr{E}_i > \mathscr{E}_f$ et son énergie interne $\mathscr{U}$ varie au cours du temps car une partie de l'énergie mécanique perdue se dissipe dans l'air ambiant et l'autre partie chauffe la bille. Pour cette exercice, on suppose que ces deux pertes se font à part égale. La variation d'énergie mécanique est égale au travail des forces de frottements. Ce travail est à l'origine de la perte d'altitude, on trouve donc :

$$\mathscr{W}(\vec{f}_{\text{frottements}}) = \Delta\mathscr{E}_m = mg(h_0 - h)$$

D'après la modélisation choisie, la moitié de cette énergie mécanique perdue sert au réchauffement de la balle, d'où : $\Delta\mathscr{U} = \frac{mg(h_0 - h)}{2}$. Comme la bille est un système condensée, on sait également que $\Delta\mathscr{U} = m \times c \times \Delta T$.

On en déduit :

$$m \times c \times \Delta T = \frac{mg(h_0 - h)}{2} \Rightarrow \Delta T = \frac{g(h_0 - h)}{2c}$$

c. En effectuant les applications numériques, et en prenant garde aux unités, on trouve que :

$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{10^2}{2 \times 9{,}81} = 5{,}1 \text{ m et } \Delta T = \frac{g(h_0 - h)}{2c} = 1{,}2 \times 10^{-3} \text{ K}$$

ce qui est insignifiant.

27. S'auto-évaluer

• Le système total est {Aluminium + Fer + Eau}. Ce système est calorifugé.

• Les échanges thermiques se font des sous-systèmes de température plus élevée vers ceux de température plus basse soit : un transfert Q_1 de l'aluminium et du fer vers l'eau, et un transfert Q_2 de l'aluminium vers le fer.

• Comme le système est calorifugé, on sait que sa variation d'énergie interne est nulle et qu'il va évoluer vers la température finale T_f.

• Comme tous les sous-systèmes sont condensés, on peut écrire :

$$\Delta\mathscr{U}_{\text{total}} = m_{\text{alu}} \times c_{\text{alu}} \times (T_f - T_1) + m_{\text{fer}} \times c_{\text{fer}} \times (T_f - T_2) + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (T_f - T_3) = 0$$

d'où :

$$T_f = \frac{m_{\text{alu}} \times c_{\text{alu}} \times T_1 + m_{\text{fer}} \times c_{\text{fer}} \times T_2 + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times T_3}{m_{\text{alu}} \times c_{\text{alu}} + m_{\text{fer}} \times c_{\text{fer}} + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}}} = 33\,^\circ\text{C}$$

On en déduit :

$Q_1 = \Delta\mathscr{U}_{\text{eau}} = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (T_f - T_3) = 15$ kJ

et

$Q_2 = \Delta\mathscr{U}_{\text{fer}} = m_{\text{fer}} \times c_{\text{fer}} \times (T_f - T_2) = 1{,}7 \cdot 10^{-1}$ kJ

28. Radiateur et transfert thermique

> COMPÉTENCES : **Connaître, réaliser.**

a. On calcule la variation d'énergie interne en notant que la capacité thermique du radiateur n'est pas massique mais totale. On obtient :

$\Delta\mathscr{U} = (\rho_{\text{eau}} \times V \times c_{\text{eau}} + C_{\text{radiateur}}) \times (\theta_2 - \theta_1)$

$= (15 \times 4{,}18 \times 10^3 + 2{,}63 \times 10^4) \times (23 - 18) = 4{,}45 \times 10^5$ J

b. Le bilan de transfert thermique nous amène à écrire :

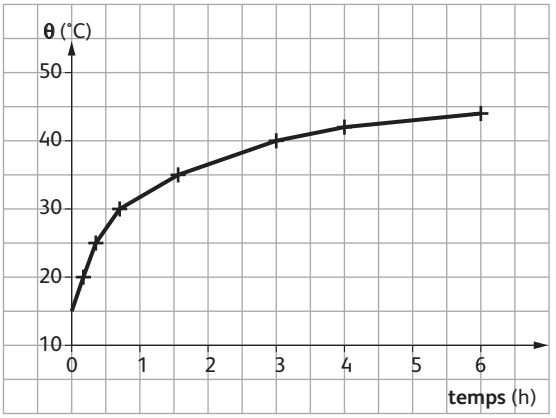
$P \times \Delta t = Q = \Delta\mathscr{U}$ d'où $\Delta t = \frac{\Delta\mathscr{U}}{P} = 2{,}5 \times 10^2$ s soit environ 4 minutes et 10 secondes.

29. Douche solaire

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, réaliser, analyser.**

1. a. Transfert thermique par rayonnement (électromagnétique).

b. *Évolution de la température en fonction du temps*



2. a. La température de l'eau lors de la mise en fonctionnement est 15 °C. Celle au bout de 5 h 30 est de 43 °C, elle est déterminée par lecture graphique.

b. On utilise : $\Delta\mathscr{U} = m \times c \times \Delta t$.

A. N. : $\Delta\mathscr{U} = 20 \times 4{,}18 \times (43 - 15) = 2{,}3 \times 10^3$ kJ.

30. ★ In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. La conservation de l'énergie mécanique permet d'affirmer que la variation d'énergie potentielle au cours de la chute correspond exactement à l'augmentation de l'énergie cinétique du sucre, soit $\Delta\mathscr{E}_c = -\Delta\mathscr{E}_{pp} = mgh$.

L'énergie cinétique initiale étant nulle, on en déduit qu'à la surface du café, l'énergie cinétique vaut :

$$\mathscr{E}_c = \frac{1}{2} mv^2 = mgh.$$

2. a. Comme l'énergie cinétique est supposée être transférée thermiquement intégralement au sucre, sous forme d'énergie interne, on en déduit :
$\Delta\mathcal{U}_{sugar} = m_{sugar} \times c_{sugar} \times \Delta T = mgh$

b. Pour que le sucre ne refroidisse pas le café, il doit atteindre la même température que celui-ci lors de l'impact, soit 50 °C, soit dans notre cadre d'hypothèses :
$h = \dfrac{c_{sugar} \times \Delta T}{g}$ soit après application numérique, en prenant garde aux unités : $h = 1{,}5$ km.

c. Ce résultat montre que ça serait absurde de procéder ainsi. Il apparaît difficile de viser correctement la tasse de cette hauteur.
On a par ailleurs négligé les frottements sur le sucre (critique de la conservation de l'énergie mécanique dans première phase) et le choc avec le café génère un transfert d'énergie cinétique au fluide café mis en mouvement. Celui-ci est éjecté de la tasse.

31. ★ Résistance thermique

> COMPÉTENCES : **Connaître, réaliser, analyser.**

a. De la même manière que la résistance $R_{élec}$ d'un conducteur ohmique permet de relier la tension (différence de potentiel) à l'intensité du courant le traversant par la loi d'Ohm $U = R_{élec} \times I$, la résistance thermique R_{th} entre deux points permet de relier la différence de température au flux thermique par la relation $\Delta T = R_{th} \times \Phi$.

b. En interprétant les données de l'énoncé, on trouve :
$$R_{élec} = \frac{e}{\lambda S}.$$

c. La résistance thermique R_{th} entre deux points permet de relier la différence de température au flux thermique par la relation $\Delta T = R_{th} \times \Phi$.

Par analogie : $R_{th} = \dfrac{e}{\lambda S}$.

Attention, ici $e = L$.

d. La résistance thermique vaut $R_{th} = 6{,}6 \times 10^{-5}\,\Omega$. La résistance thermique vaut $R_{élec} = 10\ \text{K·W}^{-1}$.

e. Le flux thermique est donné par la relation
$\Phi = \dfrac{\Delta T}{R_{th}} = \dfrac{80}{(10)} = 7{,}6$ si on calcule avec les valeurs non-arrondies.

32. ★ Utilisation d'un calorimètre

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Les différents systèmes en contact sont : {la masse d'eau froide}, {la masse d'eau chaude} et {le calorimètre}.

b. Avant le mélange, le calorimètre et la masse d'eau froide sont à la même température $\theta_1 = 10\,°C$. Après le mélange, la température de l'ensemble évolue vers une valeur unique $\theta_f = 30\,°C$.

c. La variation d'énergie interne de l'ensemble est nulle puisqu'il n'y a aucun échange avec l'extérieur, soit $\Delta\mathcal{U}(\text{ensemble}) = 0$.

d. $\Delta\mathcal{U}(\text{ensemble}) = 0 = \Delta\mathcal{U}(\text{eau froide}) + \Delta\mathcal{U}(\text{eau chaude}) + \Delta\mathcal{U}(\text{calorimètre})$
Comme l'eau est toujours liquide, on en déduit :
$\Delta\mathcal{U}(\text{ensemble}) = 0 = m_1 \times c_{eau} \times (\theta_f - \theta_1) + C_{calo} \times (\theta_f - \theta_1) + m_2 \times c_{eau} \times (\theta_f - \theta_2)$.
On en déduit :
$C_{calo} = m_1 \times c_{eau} \times \left(\dfrac{\theta_2 - \theta_f}{\theta_f - \theta_1}\right) - m_1 \times c_{eau}$ et

$\mu = \dfrac{C_{calo}}{c_{eau}} = m_2 \times \left(\dfrac{\theta_2 - \theta_f}{\theta_f - \theta_1}\right) - m_1 = 12$ g.

Cette valeur permet de remplacer dans les calculs les caractéristiques du calorimètre par une masse virtuelle d'eau. On ne réfléchit donc plus qu'en termes d'échanges entre sous-systèmes constitués de masses d'eau.

33. ★ Isolation simple, double, triple vitrage

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. On utilise les formules en lien avec la résistance thermique : $R_{th} = \dfrac{e}{\lambda S}$ et $\Phi = \dfrac{\Delta T}{R_{th}}$.

Les résistances thermiques des double et triple vitrages se déterminent en ajoutant les résistances thermiques des éléments les constituant (verre + air + verre).

Simple vitrage	$R_{th}(\text{verre}) = 8{,}3 \times 10^{-4}\ \text{K·W}^{-1}$	$\phi = 3{,}0 \times 10^{4}$ W
Double vitrages	$R_{th} = 2R_{th}(\text{verre}) + R_{th}(\text{air}) = 0{,}12\ \text{K·W}^{-1}$	$\phi = 2{,}2 \times 10^{2}$ W
Triple vitrages	$R_{th} = 3R_{th}(\text{verre}) + 2R_{th}(\text{air}) = 0{,}23\ \text{K·W}^{-1}$	$\phi = 1{,}1 \times 10^{2}$ W

Remarque : les calculs sont effectués sans arrondir les résultats intermédiaires.

b. La configuration la plus isolante est bien celle du triple vitrage. Le flux thermique est réduit d'un facteur 300 en comparaison d'un simple vitrage.

34. Bouclier thermique

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Lorsqu'un engin spatial pénètre dans l'atmosphère terrestre lors de son retour sur terre, sa structure est soumise à des frottements très importants. La température du matériau externe peut atteindre plus de 1 600 °C. Ce matériau externe porte bien son nom de bouclier thermique. C'est un matériau composite qui doit être très résistant mécaniquement et thermiquement. Il est constitué de tuiles réfractaires positionnées de façon stratégique sur la face exposée de l'engin.
Lorsqu'un problème survient, la situation peut être dramatique. Des dégâts sur le bouclier thermique peuvent conduire à la destruction de l'engin spatial. L'une des ressources évoque le cas de la navette spatiale américaine Columbia qui explosa en vol en 2003. Les conclusions de l'enquête évoquent une destruction localisée du bouclier thermique par un objet s'étant détaché de la navette.

Les solutions futures de bouclier thermique doivent présenter deux avantages :
– la mise en place simplifiée : les tuiles actuelles sont de petites tailles ce qui peut générer des défauts aux jointures lors de la pose ;
– l'inspection systématique simplifiée.
Il est difficile et laborieux d'inspecter une multitude de tuiles.
Finalement, le projet « Shingle » semble proposer une solution intéressante. Des tuiles de plus grandes tailles (1 m^2), encadrées dans une structure permettant l'installation sans problème de jointure.
Ce projet est développé par le CNES et participe à l'élaboration de l'engin spatial du futur PRE-X.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

35. LE SAUNA

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, analyser, valider, communiquer.**

1. a. Les flèches représentent les mouvements de convection de l'air (remarque : la force motrice de ces mouvements est la poussée d'Archimède).

b. Le document 2 indique que le poêle est adapté au sauna de volume compris entre 8,0 et 15,0 m^3. Or la pièce décrite dans l'énoncé a un volume de $2 \times 2 \times 3 = 12$ m^3 ce qui prouve que le poêle est adapté aux besoins du particulier.

2. a. On souhaite connaître l'épaisseur de béton $e_{béton}$ ayant la même résistance thermique que l'épaisseur $e_{sapin} = 5{,}0$ cm, pour une même surface S. On en déduit $R_{th,sapin} = R_{th,béton}$ et avec l'expression du document 3 :

$$\frac{e_{sapin}}{\lambda_{sapin} \times S} = \frac{e_{béton}}{\lambda_{béton} \times S}.$$

D'où l'épaisseur équivalente $e_{béton} = \frac{\lambda_{béton}}{\lambda_{sapin}} \times e_{sapin}$ ce qui donne après application numérique $e_{béton} = 58$ cm. Une paroi en béton doit être plus de dix fois plus épaisse pour isoler autant qu'une paroi en sapin.

b. L'énergie délivrée par le poêle vaut $\mathscr{E} = \mathscr{P} \times \Delta t$.
D'après l'hypothèse elle sert intégralement à chauffer les pierres en stéatite, soit $\mathscr{E} = \Delta \mathscr{U}$.
Or ces pierres constituent un système condensé :
$\Delta \mathscr{U} = m \times c \times \Delta T$.
D'où la relation $\Delta t = \frac{m \times c \times \Delta T}{\mathscr{P}}$, ce qui donne après application numérique $4{,}4 \times 10^2$ s soit environ 7 minutes et 20 secondes.

c. D'après la notice, le préchauffage dure entre 40 et 70 minutes ce qui invalide l'hypothèse de la question précédente. La puissance du poêle n'est pas intégralement utilisée pour le chauffage des pierres en stéatite. Elle sert également à chauffer toute la pièce (air, murs, etc.).

36. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Isoler pour faire des économies

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

On commence par évaluer le flux thermique à travers la paroi dans chacun des cas, en commençant par évaluer la résistance thermique.

Premier cas : sans isolation

$$R_{th1} = R_{th,brique} = \frac{e}{\lambda_{brique} \times S} = \frac{0{,}20}{0{,}67 \times 60} = 5{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{K·W}^{-1},$$

ce qui permet de calculer le flux

$$\Phi_1 = \frac{\Delta T}{R_{th1}} = \frac{20}{5{,}0 \times 10^{-3}} = 4{,}0 \times 10^{-3} = 4{,}0\ \text{kW}.$$

Deuxième cas : isolation par le polystyrène

$$R_{th,polystyrène} = \frac{e'}{\lambda_{polystyrène} \times S} = \frac{0{,}04}{0{,}033 \times 60} = 2{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{K·W}^{-1}$$

$$R_{th2} = R_{th1} + R_{th,polystyrène} = 2{,}5 \times 10^{-2}\ \text{K·W}^{-1} \Rightarrow \Phi_2 = \frac{\Delta T}{R_{th2}}$$
$$= 8{,}0 \times 10^2\ \text{W} = 0{,}80\ \text{kW}$$

Troisième cas : isolation par l'air

Ces flux se traduisent par une dépense électrique. En faisant l'hypothèse d'un mois de 30 jours donc 30 fois 24 heures, on en déduit les dépenses énergétiques correspondantes.

• Premier cas :
$4{,}0 \times 30 \times 24 = 2{,}9 \times 10^3$ kWh
soit un coût de $2{,}9 \times 10^3 \times 0{,}10 = 290$ €.

• Deuxième cas :
$0{,}80 \times 30 \times 24 = 5{,}7 \times 10^2$ kWh
soit $5{,}7 \cdot 10^2 \times 0{,}10 = 57$ € soit une économie de 233 € par rapport au premier cas.

• Troisième cas :
$0{,}65 \times 30 \times 24 = 4{,}7 \times 10^2$ kWh
soit $4{,}7 \cdot 10^2 \times 0{,}10 = 47$ € soit une économie de 243 € par rapport au premier cas (mais c'est plus difficile donc plus coûteux à construire).

37. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

Étude d'une installation thermique

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, communiquer.**

L'énoncé mentionne qu'il faut subvenir aux besoins de 75 campeurs qui consomment 50 litres d'eau chaude par jour, et les données indiquent qu'un ballon d'eau chaude contient 750 L, ce qui permet d'alimenter $\frac{750}{50} = 15$ campeurs. Il faut donc $\frac{75}{15} = 5$ ballons pour 75 campeurs.

Le chauffage de ces $750 \times 5 = 3\,750$ L d'eau nécessite une énergie de $\Delta \mathscr{U} = \rho_{eau} \times c_{eau} \times V \times \Delta T = 7{,}50 \times 10^8$ J.

Analyse des documents à la lumière du problème posé

• Le document 1 est une présentation générale d'un chauffe-eau solaire : ce dernier capte l'énergie solaire (rayonnement), qui fournit un transfert thermique au liquide caloporteur qui se met en mouvement grâce à la convection pour à son tour fournir un transfert thermique à l'eau du ballon par conduction via le serpentin de cuivre. Ces informations servent surtout à comprendre le fonctionnement du dispositif.

• Le document 2 présente l'énergie solaire maximale reçue par jour en France : on constate qu'à Valence, elle s'élève à 4,2 kWh·m^2.

• Le document 3 présente les deux implantations possibles : la première implantation est orientée plein Est (90° par rapport à l'axe Nord-Sud) sur un toit incliné à 60°. La seconde implantation est orientée à 15° Sud-Ouest (15° par rapport à l'axe Nord-Sud, à mesurer avec un rapporteur sur la figure qui est à l'échelle) sur un toit incliné à 30°.

• Le document 4 donne le rendement d'un capteur solaire en fonction de son orientation et de son inclinaison. C'est ce dernier qui permet de trancher entre les deux implantations. En effet, à 90° Ouest, pour une inclinaison de 60°, le rendement est à la limite entre 60 et 70 %. Le document permet cette précision.

La même lecture pour 15° Sud montre que sur un toit incliné à 30°, le rendement d'un capteur vaut 100 %. D'où le choix de l'implantation 2.

Il s'agit, une fois l'implantation 2 choisie, de savoir combien de panneaux seront nécessaires.

Avec un rendement de 100 %, un panneau peut capter l'énergie $e = 4{,}2 \times 10^3 \times 2{,}7 \times 3\,600 = 4{,}1 \times 10^7$ J.

Pour chauffer les 5 ballons il faudra utiliser $\frac{\Delta\mathcal{U}}{e} = 18{,}4$ panneaux (donc 19 pour assurer de l'eau chaude pour le camping plein) si le toit peut accueillir tous ces panneaux.

Exemple de synthèse :

Pour fournir 50 L d'eau chaude à 15 campeurs, il faut apporter aux $15 \times 50 = 750$ L d'eau un transfert thermique de $Q = \Delta\mathcal{U} = \rho_{eau} \times c_{eau} \times V \times \Delta T = 7{,}50 \cdot 10^8$ J.

À Valence, on peut espérer récupérer 4,2 kWh·m^2 par jour, soit pour un panneau solaire de surface $S = 2{,}7$ m^2 : $4{,}2 \times 10^3 \times 2{,}7 \times 3\,600 = 4{,}1 \times 10^4$ kJ ou après conversion $4{,}1 \times 10^7$ kJ.

Il faut alors choisir l'implantation des panneaux : la première possibilité présente un rendement entre 60 et 70 % alors que la seconde présente un rendement de 100 %. On privilégiera alors cette solution si c'est possible techniquement.

Il faudra alors, en supposant que toute l'énergie solaire soit transférée à l'eau, évaluer le nombre de panneaux nécessaires : $\frac{7{,}50 \times 10^8}{4{,}1 \times 10^7} = 18{,}3$ panneaux soit 19 panneaux pour assurer le confort de tous le campeurs.

CHAPITRE 18

COMPRENDRE

Transferts quantiques d'énergie

> Manuel pages 406 à 425

Choix pédagogiques

Dans ce chapitre, consacré au transfert quantique d'énergie, parmi les compétences exigibles figure une compétence expérimentale : mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information.
Le laser outil d'investigation ? On pense bien sûr à la mesure de la distance Terre-Lune mais le laser peut aussi être utilisé pour mesurer des distances très petites comme celle qui sépare les deux fentes d'Young par exemple. Cette activité expérimentale a été proposée au chapitre 5. La mesure d'une distance avec un faisceau laser est une technique connue des élèves. Il y a d'autres domaines, beaucoup moins connus des élèves, dans lesquels le laser peut être utilisé comme outil d'investigation, mais ces techniques demandent des lasers très puissants que nous ne possédons pas au lycée.
C'est pourquoi, en accord avec le programme qui laisse le choix entre outil d'investigation et transmission d'informations, nous avons préféré présenter une activité documentaire pour l'outil d'investigation et une activité expérimentale réalisable par tous pour la transmission d'informations.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Expérience permettant de refroidir des atomes de lithium grâce à des lasers.

Comment peut-on refroidir des atomes à l'aide de lasers ?

Cette expérience est une application moins connue des lasers. En effet les lasers sont surtout connus pour la grande directivité de leur faisceau et la concentration spatiale de l'énergie qui en découle. C'est cette concentration de l'énergie qui permet, comme nous le verrons dans l'activité 1, de vaporiser des roches.
C'est la monochromaticité du faisceau laser qui est utilisée dans cette expérience et la question trouvera sa réponse dans la résolution des exercices 32 et 33 de ce chapitre.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Le laser, outil d'investigation

Commentaires

Utiliser un laser pour réaliser l'analyse spectrale d'une roche, c'est le défi relevé par le rover Curiosity sur la planète Mars depuis août 2012. À son bord, un laser pulsé de 6 MW : nous sommes loin des 2 mW autorisés au lycée !
Cette activité permet de découvrir quelques propriétés du laser, grande directivité du faisceau ou forte puissance par exemple.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. Les deux propriétés du faisceau lumineux émis par le laser sont sa grande directivité (surface de 0,5 mm de diamètre à 7 m et sa grande puissance ; 6 MW).
b. Un laser pulsé est un laser qui n'émet pas en continu. Il émet des impulsions très courtes à intervalles de temps réguliers.

RÉALISER

2. a. Dans le meilleur des cas, il faut 50 impulsions pour réaliser une analyse spectrale. Avec une durée de 55 ns et une puissance de 6 MW, l'énergie nécessaire est : $\mathscr{E} = 50 \times 55 \times 10^{-9} \times 6{,}0 \times 10^{6} = 16{,}5$ J. Cette énergie est relativement faible pour vaporiser une roche. Rappelons qu'il faut un peu plus de 4 J pour élever d'un seul degré la température d'un gramme d'eau.

b. $\mathscr{P}_s = \dfrac{6{,}0 \times 10^{6}}{p \times (0{,}25 \times 10^{-3})^2} = 3{,}1 \times 10^{13}$ W·m^{-2}.

C'est 22 milliards de fois plus grand que la puissance surfacique du rayonnement solaire à midi, en été. On comprend pourquoi la roche est vaporisée.

ANALYSER

3. a. Les impulsions du laser permettent de chauffer très localement la roche à plus de 10 000°C.
Cette température est suffisante pour vaporiser superficiellement la roche.
b. Le laser pulsé permet d'avoir des impulsions de très grande puissance. Apporter la même énergie pendant un temps plus long avec un laser à émission continue

ne produit pas le même effet sur la roche car l'énergie thermique va se propager par conduction sur un volume beaucoup plus grand, produisant une élévation de température plus faible.

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Transmission de l'information avec un laser

Commentaires

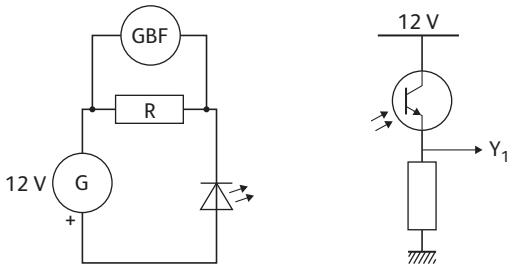
Contrairement à l'activité précédente, les lasers dont nous disposons dans les lycées permettent facilement d'illustrer le principe de la transmission d'informations, c'est pourquoi nous proposons une activité expérimentale.

Quelques informations sur le dispositif

Le matériel utilisé :

– Une diode laser. On peut utiliser la diode laser Jeulin ou utiliser la diode laser d'un niveau à bulle (10 euros environ dans les grandes surfaces de bricolage).
– Un GBF (GF3 Jeulin ou modèle équivalent)
– Un phototransistor et son alimentation continue 12 V.
– Un oscilloscope.
– Un ampli de puissance et un haut parleur (on peut utiliser l'ampli intégré dans les GBF GF3 Jeulin).
– Des fils de connexion.
– Un micro à électret amplifié.

Le montage :



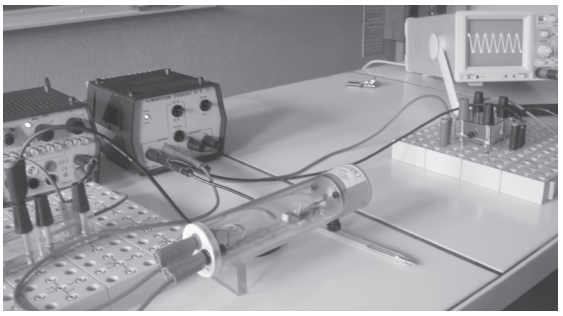
La diode laser Jeulin est alimentée par un générateur de fem E = 12 V. (À prévoir en plus dans la liste du matériel si on utilise cette diode laser). Il faut introduire en série, entre la diode et le générateur, une résistance d'une centaine d'ohms environ (une résistance radio de 120 Ω convient très bien).

Brancher la sortie du GBF en dérivation aux bornes de la résistance.

Placer l'ensemble à une extrémité de la paillasse.

Alimenter le phototransistor avec le générateur de tension continue et brancher sa sortie sur la voie I de l'oscilloscope.

Placer le phototransistor à l'autre extrémité de la paillasse de telle sorte qu'il soit dans le faisceau de la diode laser.



L'oscilloscope n'est pas indiqué dans la liste de matériel du manuel car il n'est pas utile pour les élèves. Il permet juste au professeur de déterminer, en fonction du matériel dont il dispose, la tension maximale du GBF pour que le signal délivré par le phototransistor soit sinusoïdal. Régler la fréquence du GBF sur 440 Hz puis augmenter progressivement la tension de sortie en vérifiant sur l'écran de l'oscilloscope que le signal reçu reste sinusoïdal.

Si la diode utilisée provient d'un niveau à bulle, la tension d'alimentation est fournie par deux piles de 1,5 V. Dans ces conditions, la tension délivrée par le GBF ne doit pas dépasser 0,2 V à 0,3 V et il faut utiliser une résistance plus faible pour ne pas éteindre complètement le signal (environ 50 Ω). Là aussi, des essais avant la séance de TP sont nécessaires.

Une fois les différents paramètres connus, on peut retirer l'oscilloscope et brancher à la sortie du phototransistor un ampli et un haut-parleur.

Le micro à électret amplifié se branche de la même façon, à la place du GBF.

Réponses

RÉALISER

1. a. La réalisation du protocole est décrite ci-dessus.

L'intensité du faisceau lumineux délivré par la diode laser est modulée par le GBF. Elle augmente et diminue à la fréquence du GBF. Cela est très facilement observable quand la fréquence est réglée sur 1 Hz.

b. Ne pas oublier de régler la tension du générateur de courant continu sur la tension nominale de la lampe quand on remplace la diode laser par la lampe.

VALIDER

2. a. L'objectif est atteint avec la diode laser. On peut facilement communiquer d'une paillasse à l'autre. Avec la lampe de 6 V, on ne peut pas parler de transmission car il faut que la lampe soit contre le phototransistor pour observer une modulation du son et il faut en plus que la fréquence soit relativement faible.

b. Car elle envoie un faisceau intense dans une direction privilégiée contrairement à la lampe qui émet dans toutes les directions de l'espace.

c. Le signal porteur est le faisceau laser. C'est lui qui porte l'information. Son intensité est modulée par l'information à transmettre, fournie par le GBF ou le micro à électret.

COMMUNIQUER

3. On a constaté que le faisceau lumineux de la lampe n'est pas un signal porteur efficace contrairement au faisceau laser. Ce qui distingue ces deux faisceaux, c'est d'une part la puissance et d'autre part la directivité (la puissance du faisceau laser est plus faible que celle de la lampe mais la puissance surfacique est beaucoup plus grande car le faisceau est très fin). Un signal est d'autant plus efficace que le faisceau est directif et que sa puissance surfacique est grande.

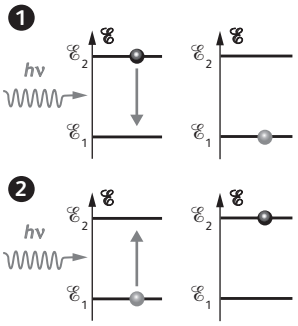
Remarques : On peut indiquer aux élèves que la transmission d'information sera étudiée un peu plus loin dans le cours et que, contrairement à ce qui vient d'être fait dans cette activité, c'est toujours un signal numérique qu'on transmet (ce qui revient à allumer ou éteindre la diode laser) car le signal numérique est très facile à régénérer. Les lasers utilisés sont des lasers infrarouges car l'atténuation dans les fibres optiques est beaucoup plus faible.

EXERCICES Appliquer le cours

Absorption et émissions quantiques (§1 du cours)

15. Reconnaître une émission et une absorption

a. Le schéma du bas ❷ représente une absorption (l'atome est initialement dans l'état fondamental) et le schéma du haut ❶ une émission (atome initialement dans l'état excité).



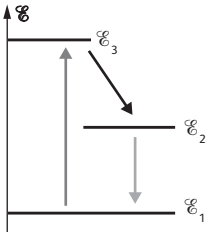
b. Voir schéma ci-contre (flèches).

c. Il s'agit d'une émission stimulée, l'atome est désexcité par le photon incident.

Application au laser (§2 du cours)

16. Connaître le principe de fonctionnement d'un laser

a. Le pompage permet de faire passer les atomes du niveau fondamental au niveau excité $\mathscr{E}_3$ (flèche à gauche sur le schéma). L'émission stimulée qui constitue la lumière émise par le laser correspond à la transition du niveau $\mathscr{E}_2$ vers le niveau $\mathscr{E}_1$ (flèche à droite).



b. Il peut y avoir émission spontanée mais elle est peu probable :

– entre les niveaux $\mathscr{E}_3$ et $\mathscr{E}_1$ car le niveau $\mathscr{E}_3$ se désexcite très vite vers le niveau $\mathscr{E}_2$ pour réaliser l'inversion de population ;

– entre les niveaux $\mathscr{E}_2$ et $\mathscr{E}_1$ car le niveau $\mathscr{E}_2$ a été choisi de telle sorte que sa durée de vie soit grande (durée de vie = temps moyen de désexcitation spontanée).

17. Connaître la directivité d'un faisceau laser

a. Soit L la distance et D le diamètre de la tache. L'angle α étant petit, on peut faire l'approximation $\tan\alpha = \alpha$.

On a donc : $D = L\alpha = 200 \times 2{,}0 \times 10^{-3} = 0{,}40$ m

b. Le diamètre du faisceau à la sortie du laser est négligeable devant le diamètre de la tache. Ce dernier est connu au cm près, alors que le diamètre du faisceau ne mesure que 1 mm. Si on avait tenu compte du diamètre du faisceau, le résultat aurait été le même.

18. Utiliser une propriété du laser

a. Puissance lors d'une impulsion :

$$\mathscr{P} = \frac{\mathscr{E}}{\Delta t} = \frac{3{,}0 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-15}} = 30 \times 10^{6}\ \text{W} = 30\ \text{MW}$$

La puissance moyenne est 100 000 fois plus faible que la puissance lors d'une impulsion si on néglige la durée d'une impulsion devant la durée qui sépare deux impulsions consécutives (simplification légitime puisque l'énergie n'est donnée qu'avec deux chiffres significatifs) : $\mathscr{P}_{moy} = 300$ W.

b. La puissance lors d'une impulsion est considérable. Le faisceau laser étant très fin, l'énergie du laser est transférée sous forme thermique à une toute petite surface de métal et dans une durée trop petite pour que cette énergie puisse, par conduction, être répartie sur un volume plus grand. Le métal est sublimé instantanément.

Domaine spectral et transitions quantiques (§3 du cours)

19. Associer une transition à un domaine spectral

L'énergie du photon est liée à la fréquence de la radiation associée par la relation $|\Delta\mathscr{E}| = h\nu$.

$$\nu = \frac{|\Delta\mathscr{E}|}{h} = \frac{5{,}67 \times 10^{-19}}{6{,}63 \times 10^{-34}} = 8{,}55 \times 10^{14}\ \text{Hz}.$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{8{,}55 \times 10^{14}} = 3{,}51 \times 10^{-7}\ \text{m ou } 351\ \text{nm}.$$

Il s'agit d'une radiation ultraviolette.

20. Associer un domaine spectral à une énergie

a. La longueur d'onde est de l'ordre du micromètre. Elle appartient au domaine des infrarouges.

b. Calculons l'énergie transportée par le photon associé à cette radiation :

$$\mathscr{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{1{,}6 \times 10^{-6}} = 1{,}24 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

Convertissons cette énergie en eV :

$$\mathscr{E} = \frac{1{,}24 \times 10^{-19}}{1{,}60 \times 10^{-19}} = 0{,}78\ \text{eV}$$

Cette énergie permet des transitions entre des niveaux d'énergie rotationnelle et entre des niveaux d'énergie vibrationnelle mais elle est insuffisante pour permettre des transitions électroniques.

EXERCICES S'entraîner

21. Exercice résolu dans le manuel

22 Application de l'exercice résolu

1. Calculons l'énergie du photon émis lors de la transition :

$$\mathscr{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{330{,}3 \times 10^{-9} \times 1{,}60 \times 10^{-19}} = 3{,}76 \text{ eV}$$

L'atome a perdu cette énergie pour revenir à l'état fondamental $\mathscr{E}_n - 3{,}76 = -5{,}14$ $\mathscr{E}_n = -1{,}38$ eV (niveau 5).

2. Pour désexciter l'atome dans le premier état excité, il faut un photon d'énergie $\mathscr{E} = 5{,}14 - 3{,}03 = 2{,}11$ eV (le photon doit avoir l'énergie qui correspond à la transition entre les deux niveaux).

$\mathscr{E} = 2{,}11 \times 1{,}60 \times 10^{-19} = 3{,}38 \times 10^{-19}$ J.

3. Fréquence de la radiation associée :

$$\nu = \frac{\mathscr{E}}{h} = \frac{3{,}38 \times 10^{-19}}{6{,}63 \times 10^{-34}} = 5{,}09 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

23. Exercice résolu dans le manuel

24. Application de l'exercice résolu

1. $\lambda = 650$ nm correspond à une radiation rouge.

2. Calculons l'énergie en joule :

$$\mathscr{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{650 \times 10^{-9}} = 3{,}06 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

3. Chaque seconde, le faisceau transporte une énergie $\mathscr{E}_f = \mathscr{P} \times \Delta t = 1{,}00 \times 10^{-3} \times 1{,}0 = 1{,}0 \times 10^{-3}$ J.

Il y a donc chaque seconde émission de :

$$n = \frac{1{,}0 \times 10^{-3}}{3{,}06 \times 10^{-19}} = 3{,}3 \times 10^{15} \text{ photons.}$$

25. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. Le domaine des ondes électromagnétiques infrarouges s'étend de 800 nm à 1 mm (8×10^{-7} m – 10^{-3} m) Le nombre d'onde est l'inverse de la longueur d'onde. Les longueurs d'onde de la bande 4 000 cm^{-1} – 2 000 cm^{-1} sont donc comprises entre $\frac{1}{4\,000}$ cm et $\frac{1}{2\,000}$ cm soit $2{,}5 \times 10^{-4}$ m et 5×10^{-4} m. Elles sont donc bien situées dans le domaine infrarouge.

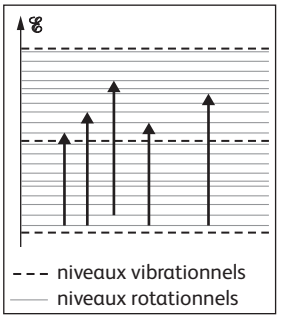
b. Les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font par quanta.

Un rayonnement permet aux atomes de la molécule d'hexan-1-ol de changer de niveau d'énergie électronique si les photons associés à ce rayonnement transportent une énergie suffisante. Le photon qui transporte la plus grande énergie dans le domaine considéré est celui associé à la radiation de plus petite longueur d'onde. Calculons l'énergie transportée :

$$\mathscr{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{2{,}5 \times 10^{-4}} = 8{,}0 \times 10^{-22} \text{ J}$$

soit $5{,}0 \times 10^{-3}$ eV.

L'énergie nécessaire pour réaliser des transitions électroniques est de l'ordre de l'eV. Dans le domaine considéré, le rayonnement infrarouge ne permet pas de changer de niveau électronique.



c. Une molécule possède également de l'énergie rotationnelle et de l'énergie vibrationnelle dont les ordres de grandeurs sont 10^{-1} eV pour l'énergie vibrationnelle et 10^{-3} eV pour l'énergie rotationnelle. Dans le domaine représenté sur le schéma, seuls des changements de niveaux rotationnels sont possibles. Si on s'intéresse à l'ensemble du domaine IR, des transitions entre niveaux vibrationnels sont également possibles.

d. La transition entre deux niveaux rotationnels est environ 1 000 fois plus faible que la transition entre deux niveaux vibrationnels. Il y a donc un très grand nombre de niveaux d'énergie rotationnelle pour chaque niveau d'énergie vibrationnelle. Lors du passage d'un niveau d'énergie vibrationnelle à un autre, il y a un très grand nombre de transitions possibles. Les raies d'absorption ont des fréquences trop voisines pour pouvoir être discernées. On observe des bandes d'absorption.

26. Laser médical

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. Cette radiation appartient au domaine des infrarouges.

b. Le faisceau est de couleur rouge.

c. Pour que le chirurgien puisse balayer la tumeur avec le faisceau laser, il faut que Celui-ci soit visible. Le laser utilisé étant dans le domaine de l'infrarouge, la lumière émise n'est pas visible c'est pourquoi on utilise un laser auxiliaire.

d. Chaque photon transporte une énergie

$$|\Delta\mathscr{E}| = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{10{,}6 \times 10^{-6}} = 1{,}88 \times 10^{-20} \text{ J.}$$

Chaque seconde, le faisceau transporte une énergie $\mathscr{E} = 2{,}7 \times 10^{21} \times 1{,}88 \times 10^{-20} = 51$ J.

Il a donc une puissance de 51 W.

27. Célérité de la lumière

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

$\lambda = \frac{c}{\nu}$

$c = \lambda\nu = 3{,}392231400 \times 10^{-6} \times 88376181{,}627 \times 10^{6}$

$= 299\,792\,458$ m·s^{-1}.

28. In English Please

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, communiquer.**

Le phénomène observé est dû à la grande cohérence de la lumière émise par le laser. Les ondes diffusées dans toutes les directions par la surface du verre dépoli interfèrent entre elles. En certains points de la surface, ces interférences sont destructives ce qui fait apparaître de petites taches noires.

29. ★ Photons émis par un laser

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

Un laser de 2mW rayonne chaque seconde une énergie $\mathscr{E} = 2\text{mJ}$ ($\mathscr{E} = \mathscr{P}\,\Delta t$).

Calculons l'énergie transportée par un photon.

$$|\Delta\mathscr{E}| = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63\times10^{-34}\times3{,}00\times10^{8}}{632{,}8\times10^{-9}} = 3{,}14\times10^{-19}\ \text{J}.$$

Nombre de photons émis chaque seconde :

$$n = \frac{\mathscr{E}}{|\Delta\mathscr{E}|} = \frac{2\times10^{-3}}{3{,}14\times10^{-19}} = 6\times10^{15}.$$

L'ordre de grandeur du nombre de photons est donc 10^{16}.

30. ★ S'auto-évaluer

Énergie transportée dans une impulsion :

$\mathscr{E}_{\text{imp}} = \mathscr{P}\,\Delta t = 30\times10^{6}\times100\times10^{-15} = 3{,}0\times10^{-6}$ J.

Énergie d'un photon :

$$\mathscr{E}_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63\times10^{-34}\times3{,}00\times10^{8}}{532\times10^{-9}}$$

$$= 3{,}74\times10^{-19}\ \text{J}.$$

Nombre de photons par impulsion :

$$N = \frac{\mathscr{E}_{\text{imp}}}{\mathscr{E}_{\text{photon}}} = \frac{3{,}0\times10^{-6}}{3{,}74\times10^{-19}} = 8{,}0\times10^{12}\ \text{photons}.$$

Distance parcourue par la lumière en 100 fs :

$L = v\times\Delta t = 3{,}00\times10^{8}\times100\times10^{-15}$

$= 3{,}00\times10^{-5}\ \text{m} = 3{,}00\times10^{-2}\ \text{mm}.$

La section du faisceau étant de 1,0 mm², les photons sont contenus dans un volume :

$$V = 1{,}0\times3{,}00\times10^{-2} = 3{,}0\times10^{-2}\ \text{mm}^3.$$

On en déduit le nombre de photons par mm³ à la sortie du laser :

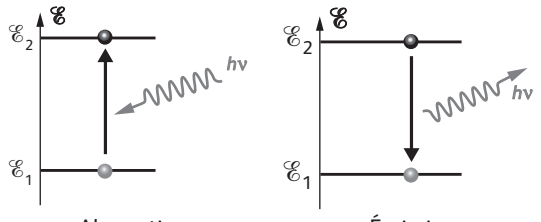
$$n = \frac{N}{V} = \frac{8{,}0\times10^{12}}{3{,}0\times10^{-2}} = 2{,}7\times10^{14}\ \text{photons/mm}^3$$

31. ★ Variation d'énergie d'un atome

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. L'atome passe du niveau fondamental $\mathscr{E}_1$ qui constitue donc l'état initial au niveau excité $\mathscr{E}_2$ qui constitue l'état final.

On a donc $|\Delta\mathscr{E}| = \mathscr{E}_2 - \mathscr{E}_1 > 0$ car $\mathscr{E}_2 > \mathscr{E}_1$.



Absorption Émission

b. L'énergie du photon a pour expression $\mathscr{E}_{\text{photon}} = h\nu$. C'est une grandeur toujours positive. D'autre part, il n'y a absorption du photon que si la transition est possible c'est-à-dire si l'énergie apportée par le photon correspond au passage du niveau fondamental au niveau excité.

On a donc $|\Delta\mathscr{E}| = \mathscr{E}_2 - \mathscr{E}_1 = h\nu$.

c. L'énergie du photon est la même. Elle est toujours positive et a comme valeur $\mathscr{E}_{\text{photon}} = h\nu$.

d. Pour l'émission, l'état excité $\mathscr{E}_2$ est l'état initial et l'état fondamental $\mathscr{E}_1$ est l'état final.

On a donc $|\Delta\mathscr{E}| = \mathscr{E}_1 - \mathscr{E}_2 < 0$ car $\mathscr{E}_2 > \mathscr{E}_1$.

e. Puisque l'énergie du photon $h\nu$ est toujours positive, on peut écrire : $\mathscr{E}_1 - \mathscr{E}_2 = -h\nu$ ou encore $-\Delta\mathscr{E} = h\nu$.

La relation $|\Delta\mathscr{E}| = h\nu$ est donc vraie à l'émission comme à l'absorption d'un photon.

32. ★★ Ralentissement d'un jet d'atomes

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, réaliser.**

a. $|\Delta\nu| = \dfrac{h\nu}{mc}$

$$|\Delta\nu| = \frac{3{,}38\times10^{-19}}{3{,}82\times10^{-26}\times3{,}00\times10^{8}} = 2{,}95\times10^{-2}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

b. Cette diminution est extrêmement faible. Elle correspond à 3/100 000$^{\text{e}}$ $\left(\dfrac{2{,}95\times10^{-2}}{1{,}00\times10^{3}}\right)$ de la vitesse initiale.

c. Le photon absorbé provient toujours de la même direction alors que le photon est émis dans n'importe quelle direction, ce qui fait que pour un grand nombre d'émissions, les photons sont émis avec la même probabilité dans toutes les directions. La valeur de la vitesse, diminuée par l'émission d'un photon peut être augmentée par un photon émis en sens inverse. Sur un grand nombre d'émissions, les variations de vitesse se compensent.

d. Appliquons la relation donnée dans le texte :

$$a = \frac{2{,}95\times10^{-2}}{10^{-8}} = 2{,}95\times10^{6}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}.$$

Cette accélération est considérable : environ 3×10^{5} fois plus grande que l'accélération de la pesanteur.

e. En choisissant un axe Ox orienté dans le sens du mouvement des atomes de sodium, on a :

$$v_x = -2{,}95\times10^{6}\,t + 1{,}00\times10^{3}$$

$$x = \frac{1}{2}(-2{,}95\times10^{6})\,t^2 + 1{,}00\times10^{3}\,t$$

La première équation permet de calculer t en écrivant que $v = 0$. On trouve $t = 3{,}39\times10^{-4}$ s.

En remplaçant dans la deuxième on trouve : $x = 0{,}169$ m.

f. Les atomes étant en mouvement, la fréquence des photons absorbés dépend de la vitesse des atomes de sodium. Il s'agit de l'effet Doppler.

33. ★★ Refroidissement Doppler

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider, communiquer.**

Premier cas

a. Cette phrase signifie que l'énergie des photons associés à cette radiation correspond à une transition possible entre le niveau fondamental et un niveau excité de l'atome. Le photon peut donc être absorbé.

b. Non puisque l'atome est immobile. Il « voit » donc les radiations avec la même fréquence. Celle-ci étant inférieure à la fréquence pour laquelle l'atome absorbe les

photons, la probabilité que l'atome absorbe un photon est faible et identique pour les deux faisceaux.

c. Pour que l'atome se mette en mouvement, il faudrait qu'il absorbe les photons provenant d'un seul faisceau, ce qui n'est pas possible puisque la probabilité d'absorber est la même.

Deuxième cas

a. Non, pour l'atome, les deux sources sont en mouvement. La source de gauche s'approche et celle de droite s'éloigne. Il y a donc un effet Doppler.

b. Plus la fréquence de la radiation est proche de la fréquence d'absorption, plus la probabilité d'absorber un photon augmente. Comme au départ, $v < v_0$, la probabilité va augmenter du côté où la fréquence vue par l'atome augmente c'est-à-dire du côté où la source s'approche. Il y aura donc augmentation de la probabilité d'absorber un photon venant de la gauche et diminution de la probabilité d'absorber un photon provenant de la droite (puisque l'écart entre v et v_0 augmente de ce côté).

c. L'ensemble « photon–atome » est un système isolé. La quantité de mouvement de l'ensemble reste constante au cours de l'absorption. La quantité de mouvement du photon étant de sens opposé à celle de l'atome, la quantité de mouvement de l'atome après absorption sera plus petite.

$$m\vec{v} + \overrightarrow{p_{photon}} = m\vec{v} \rightarrow mv - p_{photon} = mv' \rightarrow v' < v$$

On peut également raisonner sur la force que subit l'atome lorsqu'il rencontre le photon.

d. Il se passe le phénomène inverse, l'atome va absorber les photons venant de la droite ce qui va diminuer sa vitesse.

e. Refroidir un gaz, c'est diminuer l'agitation thermique, c'est-à-dire les mouvements désordonnés des atomes. Ces mouvements étant de directions quelconques, il faut pouvoir les ralentir dans les trois dimensions, d'où le dispositif.

34. ★★ Monochromaticité du laser

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a. L'énergie transportée par le faisceau laser provient du générateur qui produit la décharge électrique dans le gaz.

b. La décharge électrique apporte l'énergie nécessaire aux atomes pour passer de l'état fondamental à l'état excité dans lequel ils se trouvent au moment de l'émission stimulée.

c. La dernière phrase du document peut se mettre sous la forme mathématique : $2L = k\lambda$.

d. En exprimant λ en fonction de la fréquence, cette expression devient : $2L = \dfrac{kc}{v_k}$ en appelant n_k la fréquence correspondant à k. $\Rightarrow v_k \dfrac{kc}{2L}$

Pour obtenir la plus petite différence entre deux fréquences, il faut donner à k deux valeurs consécutives :

$$v_{k+1} - v_k = \frac{(k+1)c}{2L} - \frac{kc}{2L} = \frac{c}{2L}$$

A. N. : $v_{k+1} - v_k = \dfrac{3{,}00 \times 10^8}{2 \times 0{,}300} = 500 \times 10^8$ Hz = 500 MHz

e. Le mélange est tel que $\Delta v = 1\,400$ Mhz $> n_{k+1} - n_k$: il peut donc y avoir plusieurs fréquences émises.

Remarque : En supposant que ce laser est le laser hélium néon utilisé dans les lycées, on peut considérer qu'il est monochromatique car $v = \dfrac{c}{\lambda} = \dfrac{3{,}00 \times 10^8}{632{,}8 \times 10^{-9}} = 4{,}74 \times 10^{14}$ Hz et $\dfrac{\Delta v}{v} = \dfrac{5{,}00 \times 10^8}{4{,}74 \times 10^{14}} = 10^{-6}$.

35. Intérêt du laser femtoseconde

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Après avoir rappelé ce qu'est un laser femtoseconde, l'élève doit mettre en avant les caractéristiques principales de ce laser, à savoir sa grande puissance et la durée très brève des impulsions. Le principal intérêt du laser femtoseconde, quel que soit le domaine d'application, réside justement dans la durée des impulsions qui évite par sa brièveté les effets thermiques. L'énergie thermique n'a pas le temps de se propager par conduction autour de l'endroit touché par le faisceau. Cela permet de vaporiser la matière touchée par le faisceau sans chauffer la matière environnante. On trouve ainsi des lasers femtoseconde dans l'industrie (micro-usinage) et en ophtalmologie (découpe de la cornée)

Un autre intérêt de la durée des impulsions est l'utilisation du laser comme flash pour prendre des photos avec un temps d'exposition très court. On peut ainsi photographier la rupture ou la formation de liaisons chimiques.

Intérêts liés à la puissance des impulsions	L'énergie apportée permet de sublimer en surface le matériau éclairé. Applications : gravure, découpe de la rétine.
Intérêts liés à la durée des impulsions	Les impulsions très courtes limitent les effets thermiques. La matière environnante n'est pas chauffée. Chronophotographie sur une échelle de temps très brève.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

36. CHEMCAM

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. a. On peut citer la monochromaticité, la directivité du faisceau et une grande puissance surfacique (concentration spatiale de l'énergie). Dans le cas d'un laser pulsé, il y a aussi une concentration temporelle de l'énergie.

b. Non, il émet de la lumière infrarouge (1 067 nm > 800 nm).

c. L'irradiance est la puissance par unité de surface :

$$I = \frac{\mathcal{P}}{S} = \frac{\mathcal{P}}{\pi R^2}.$$

On peut calculer la puissance à partir de l'énergie délivrée pendant la durée Δt :

$$\mathcal{P} = \frac{\mathscr{E}}{\Delta t} \Rightarrow I = \frac{\mathscr{E}}{\pi R^2 \Delta t}$$

A. N. : il faut exprimer le rayon en cm pour obtenir l'irradiance en W·cm^{-2}.

$$I = \frac{15 \times 10^{-3}}{\pi \times (175 \times 10^{-4})^2 \times 5 \times 10^{-9}}$$

$= 3 \times 10^9$ W·cm^{-2}

$= 3$ GW·cm^{-2} > 1 GW·cm^{-2}.

L'irradiance est suffisante pour créer le plasma.

2. a. Chaque atome possède des niveaux d'énergie bien déterminés, différents d'un atome à l'autre. (C'est la quantification.)

L'énergie $\Delta\mathscr{E}$ échangée lors des différentes transitions est donc quantifiée et les longueurs d'onde correspondantes $\lambda = \frac{hc}{\Delta\mathscr{E}}$ sont caractéristiques des niveaux d'énergie de l'atome. Le spectre est donc différent d'un atome à l'autre.

Remarque : on lit souvent dans les manuels ou les corrigés d'exercices que le spectre est caractéristique de l'élément chimique qui émet la lumière ce qui est complètement faux : un atome et un ion du même élément chimique n'ont pas le même spectre.

Le spectre de l'ion hélium He^+ est plus proche du spectre de l'hydrogène que du spectre de l'hélium non ionisé.

b. $\Delta\mathscr{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^8}{423 \times 10^{-9} \times 1{,}60 \times 10^{-19}} = 2{,}94$ eV

Il s'agit du retour au niveau fondamental à partir du deuxième état excité.

c. Si l'analyseur spectral fonctionne correctement, on doit retrouver dans le spectre les raies de l'ion calcium, ce qui est le cas.

Longueur d'onde des raies d'émission de l'ion Ca^+ (nm)	394	397	423	443	444	446
Correspondance avec le spectre de la roche témoin (doc. 3)	C	D	F	J	K	L

37. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Micro-texturation de surface par un laser femtoseconde

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, réaliser, communiquer.**

Pour déterminer la durée Δt nécessaire à la gravure d'une cavité, il faut déterminer le nombre d'impulsions n. La durée entre deux impulsions consécutives Δt_I étant connue puisqu'on connaît la fréquence f des impulsions, on peut déduire la durée de la gravure par la relation :

$$\Delta t = n\,\Delta t_I \quad \text{ou} \quad \Delta t = \frac{n}{f}.$$

Le nombre d'impulsions dépend du taux d'ablation par impulsion. Celui-ci est donné par le graphique du document 3 si on connaît la fluence du laser.

La première grandeur à calculer est donc la fluence du laser dont la définition est donnée dans le document 3.

Pour cela, il faut l'énergie transportée par une impulsion. Il faut donc connaître la relation entre puissance et énergie $\mathscr{E} = \mathcal{P} \times \tau$:

$$F = \frac{\mathscr{E}}{S} = \frac{\mathcal{P} \times \tau}{\pi R^2} = \frac{4\mathcal{P} \times \tau}{\pi D^2}$$

Le diamètre doit être exprimé en cm :

$$F = \frac{4 \times 1{,}0 \times 10^9 \times 150 \times 10^{-15}}{\pi \times (98 \times 10^{-4})^2} = 2{,}0 \text{ J·cm}^{-2}$$

Le graphique du document 3 nous indique que pour cette fluence, le taux d'ablation est de 100 nm par impulsion. Pour une profondeur de 6 µm, il faut donc :

$\frac{6 \times 10^3}{100} = 60$ impulsions.

On ne s'intéresse pas au diamètre de la cavité puisqu'il est égal à celui du faisceau.

$$\Delta t = \frac{n}{f} = \frac{60}{1{,}0 \times 10^3} = 0{,}06 \text{ s} \quad \text{ou} \quad 60 \text{ ms}.$$

CHAPITRE 19

COMPRENDRE

Dualité onde-particule

> Manuel pages 426 à 471

Choix pédagogiques

Dans la première partie du cours, l'aspect particulaire de la lumière abordé en classe de 1re S est généralisé à l'ensemble des rayonnements électromagnétiques. On attribue alors au photon, en plus du quantum d'énergie $h\nu$, une quantité de mouvement ; l'effet Compton abordé en termes de chocs entre particules a été choisi pour confirmer le comportement particulaire des photons.
Suivant le cheminement historique, la deuxième partie introduit ensuite les ondes de matière et la relation de de Broglie.
La dualité onde-particule qui s'applique aussi bien aux rayonnements électromagnétiques qu'aux ondes de matière constitue la dernière partie ; la notion d'objet quantique et la nécessité de traiter son comportement en termes de probabilité (sans développement mathématique) termine le chapitre.
Les quatre activités introduisent ou illustrent ces différentes parties.
Des animations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Photographie en fausses couleurs d'une moisissure prise avec un microscope électronique à balayage.

Quelle propriété de la matière est utilisée dans un microscope électronique à balayage ?

La photographie d'origine a été prise avec un grossissement de 300 puis agrandie dans le manuel ; l'image présentée est de l'ordre de 400 – 450 fois plus grande que les cellules végétales (note : grossissement basé sur l'hypothèse d'un grandissement à 142,7 % de la photographie).
Les MEB actuellement utilisés dans les laboratoires permettent d'atteindre des grossissements de l'ordre de 100 000.
Les microscopes électroniques à balayage (MEB) ont l'avantage de fournir des images en relief mais avec des résolutions souvent plus faibles que celles des microscopes électroniques en transmission (MET).

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
L'effet Compton

Commentaires

Cette première activité permet tout d'abord de réinvestir les connaissances des élèves sur l'aspect particulaire des rayonnements électromagnétiques, aspect abordé en classe de 1re S.
Elle fournit aussi l'occasion de montrer le cheminement de la science avec les controverses qui divisent le milieu scientifique de l'époque de Compton et les difficultés rencontrées par Compton lui-même pour fournir une interprétation satisfaisante de son expérience.

Réponses

COMMUNIQUER

1. En attribuant un caractère particulaire aux rayons X, le raisonnement est le suivant :
– un photon X incident a une énergie $\mathscr{E} = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda}$;
– un photon diffusé a une énergie $\mathscr{E}' = h\nu' = \dfrac{hc}{\lambda'}$;
– l'expérience montre que $\lambda' > \lambda$ donc $\mathscr{E}' < \mathscr{E}$.
Les photons diffusés ont donc une énergie inférieure à celle des photons incidents.

ANALYSER

2. Pour des valeurs de θ comprises entre 0 et $\pm\dfrac{\pi}{2}$, $\cos\theta$ prend des valeurs de 0 à 1.
$\Delta\lambda$ prend donc des valeurs comprises entre 0 et $2{,}42 \times 10^{-12}$ m.

RÉALISER

3. D'après la relation $h = \dfrac{\mathscr{E}}{\nu}$, on en déduit :
$\dim(h) = \dim(\text{énergie}) \times T$.

D'après la définition de l'énergie cinétique $\mathscr{E} = \frac{1}{2}mv^2$:

$$\dim(mc) = \dim\left(\frac{\frac{1}{2}mc^2}{c}\right)$$

$$\dim(mc) = \frac{\dim(\text{énergie})}{\mathrm{L} \times \mathrm{T}^{-1}}.$$

Donc :

$$\dim\left(\frac{h}{mc}\right) = \frac{\dim(\text{énergie}) \times \mathrm{T} \times \mathrm{L} \times \mathrm{T}^{-1}}{\dim(\text{énergie})} = \mathrm{L}.$$

A. N. :

$$\lambda_{\text{Compton}} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{9{,}11 \times 10^{-31} \times 3{,}00 \times 10^{8}} = 2{,}43 \times 10^{-12}\ \text{m}.$$

VALIDER

4. a. La valeur référence est :
$2{,}426\,310\,238\,9 \times 10^{-12} \pm 0{,}000\,000\,001\,6 \times 10^{-12}$ m.
La valeur déterminée dans la question **3** n'est pas comprise dans l'intervalle d'incertitude, elle ne semble donc pas cohérente. En réalité, il n'est ici pas possible de comparer la valeur déterminée en question **3** à la valeur de référence car ces deux grandeurs sont données avec des précisions beaucoup trop différentes. La valeur déterminée en question **3** est une valeur approchée, elle diffère de 0,15 % de la valeur de référence et peut donc être considérée comme satisfaisante, compte tenu de son niveau de précision.
b. Pour mettre en évidence une différence de longueur d'onde de l'ordre de 10^{-12} m, les rayonnements électromagnétiques utilisés doivent avoir des longueurs d'onde voisines. C'est le cas des rayons X dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre 10^{-11} m et 10^{-8} m. Les longueurs d'onde des rayonnements UV, comme les rayonnements visibles, sont supérieures à 10^{-8} m et une différence de longueur d'onde de l'ordre de 10^{-12} m est alors difficilement mesurable.
c. L'application de la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie totale du système constitué par un électron et une autre particule, le photon, conduit au résultat. Ainsi, l'interprétation de l'expérience de Compton confirme l'hypothèse des photons : les rayonnements électromagnétiques dont la lumière constitue la partie visible ont un comportement particulaire.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Le comportement ondulatoire des électrons

Commentaires

L'activité présente des situations où l'aspect ondulatoire de la matière est significatif.
Les hypothèses de Louis de Broglie sont données dans le texte permettant de traiter cette activité avant le cours.
L'introduction situe historiquement les expériences de diffraction qui ont constitué une preuve de l'aspect ondulatoire de la matière postulé par Louis de Broglie.
La diffraction de particules matérielles (électrons, neutrons) étant fréquemment utilisée en physique et chimie du solide afin d'étudier la structure cristalline d'un matériau donné, l'exploitation porte sur ces techniques.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Le phénomène physique sur lequel sont basées les expériences est le phénomène de diffraction.
L'expérience de Davisson et Germer étudie les électrons réfléchis par un cristal alors que l'expérience de Thomson étudie les électrons transmis.

ANALYSER

2. Le phénomène de diffraction se produisant lorsque la longueur d'onde de l'onde est de l'ordre de 10^{-10} m. Les rayons X dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre 10^{-11} m et 10^{-8} m sont adaptés.
3. La longueur d'onde associée à une particule matérielle est donnée par la relation :

$$\lambda = \frac{h}{p}\ ;\ \text{avec } p = mv \quad \text{et} \quad \mathscr{E}_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times \frac{p^2}{m}$$

$$\text{soit } p = \sqrt{2m\,\mathscr{E}_c}.$$

La longueur d'onde de Broglie est :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{0{,}5}{\sqrt{2m\,\mathscr{E}_c}}.$$

Les unités à employer sont les unités SI : l'énergie doit être en joule.

$$\mathscr{E}_c = 100 \times 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

$$\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9{,}11 \times 10^{-31} \times 100 \times 1{,}60 \times 10^{-19}}}$$

$$= 1{,}23 \times 10^{-10}\ \text{m}.$$

VALIDER

4. a. Le phénomène de diffraction se produisant lorsque la longueur d'onde de l'onde est de l'ordre de 10^{-10} m et la longueur d'onde associée à ces électrons étant de l'ordre de 10^{-10} m, ces électrons peuvent donner lieu au phénomène de diffraction par un cristal.
b. Le phénomène de diffraction est caractéristique des ondes ; en donnant lieu au phénomène de diffraction, les électrons montrent un aspect ondulatoire.
De plus, l'expérience valide la relation de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

En effet, la figure de diffraction est identique lorsqu'elle est obtenue pour un même cristal :
– avec des rayons X de longueur d'onde dans le vide λ ;
– avec des électrons dont la longueur d'onde associée calculée avec la relation de de Broglie est égale à la même valeur λ.

3. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
La dualité onde-particule

Commentaires

L'objectif de l'activité est de mettre en évidence la complémentarité des deux aspects de la lumière et d'introduire une interprétation probabiliste du phénomène d'interférence.

Pour aborder la dualité onde-particule, le choix s'est porté sur la description d'une expérience d'interférence réalisée par une équipe de scientifiques français, expérience dont la particularité est d'utiliser une source de lumière délivrant des photons un par un.

L'observation vidéo de la réalisation progressive des interférences est disponible.

Pour compléter la description et l'exploitation de cette expérience, on peut :

– consulter des articles tel que celui publié en 2005 dans *The European Physical Journal* intitulé « Single-photon wavefront-splitting interference » dont les auteurs sont J.-F. Roch, V. Jacques, E.Wu, T. Toury, F. Treussart du laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire de l'ENS Cachan et A. Aspect, P. Grangier du laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique d'Orsay ;

– visionner une partie de la conférence donnée par le physicien Philippe Grangier sur le thème de la physique quantique :

http://www.canal-u.tv/videouniversite_de_tous_les_savoirs la_physique_quantique_philippe_grangier.1434

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. La source émet les photons un par un.

b. Le photon se montre sous son aspect particulaire lorsqu'il arrive sur le détecteur, chaque impact se traduisant par un point.

Le photon se montre sous son aspect ondulatoire lorsque le motif des franges d'interférence apparaît.

ANALYSER

2. a. Les photons étant émis un par un, deux photons ne peuvent pas interférer. La formation des franges d'interférence ne s'explique pas par une interaction entre deux photons.

b. Une frange brillante correspond à une probabilité de présence maximale des photons, alors que les franges sombres correspondent à une probabilité de présence minimale.

c. À la date $t = 10$ s, la position des impacts semble aléatoire car le nombre de photons reçus n'est pas suffisant. Le nombre de photons doit être important pour que la loi de probabilité se manifeste et que le motif caractéristique des interférences apparaisse.

VALIDER

3. On ne peut pas dissocier l'aspect ondulatoire et l'aspect particulaire d'un photon : le photon est un objet quantique qui manifeste l'un ou l'autre de ses aspects selon les conditions d'observation.

Il ne peut être décrit que par la mécanique quantique qui lui associe une fonction d'onde permettant de calculer sa probabilité de présence en un endroit donné.

4. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Du microscope optique au microscope électronique

Commentaires

La première partie de l'activité définit la résolution d'un microscope et sa limite de résolution. Le lien entre la valeur de la longueur d'onde de l'onde utilisée et cette limite conduit à envisager l'utilisation d'ondes autres que les ondes électromagnétiques.

Le microscope électronique qui utilise une onde de matière est alors introduit montrant la similitude entre ondes électromagnétiques et ondes de matière.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. Le phénomène de diffraction limite la résolution d'un microscope.

b. La limite de résolution est proportionnelle à la longueur d'onde de l'onde utilisée.

c. Comme toutes particules matérielles, les électrons peuvent avoir un comportement ondulatoire.

d. La longueur d'onde de l'onde associée à des électrons peut être plus petite que celle de la lumière ; la limite de résolution est alors plus petite.

ANALYSER

2. L'ensemble du dispositif est dans le vide pour éviter les interactions entre les électrons du faisceau et les molécules de l'air.

COMMUNIQUER

3. Les microscopes à sonde locale utilisent les interactions qui se produisent entre l'échantillon étudié et une pointe très fine qui se déplace au-dessus de l'échantillon. Ils permettent de visualiser la topographie de la surface d'un échantillon à l'échelle de l'atome. Il existe plusieurs types de microscopes à sonde locale comme :

– le microscope à force atomique (AFM) qui utilise la force de répulsion entre d'une part les nuages électroniques des atomes de la surface de l'échantillon et d'autre part le nuage électronique des atomes de la pointe ;

– le microscope à effet tunnel qui mesure l'intensité d'un courant résultant du passage d'électrons entre la pointe et la surface d'un échantillon conducteur ; la pointe métallique étant déplacée à une distance suffisamment faible de l'échantillon, les électrons peuvent passer par effet tunnel de l'échantillon à la pointe.

EXERCICES Appliquer le cours

Onde électromagnétique et photon (§1 du cours)

16. Formuler l'hypothèse d'Einstein

Einstein postule que la lumière est formée de quanta d'énergie. Il leur attribue une énergie $|\Delta\mathscr{E}| = h\nu$ et une quantité de mouvement $p = \dfrac{h\nu}{c}$.

17. Connaître la quantité de mouvement d'un photon

a. L'énergie du photon étant $|\Delta\mathscr{E}| = h\nu$, la fréquence est :

$$\nu = \frac{|\Delta\mathscr{E}|}{h}.$$

A.N. : $\nu = \dfrac{2{,}0 \times 10^{-15}}{6{,}63 \times 10^{-34}} = 3{,}0 \times 10^{18}$ Hz.

La longueur d'onde est :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

A.N. : $\lambda = \dfrac{3{,}00 \times 10^{8}}{3{,}0 \times 10^{18}} = 1{,}0 \times 10^{-10}$ m $= 0{,}10$ nm.

Ce photon n'appartient pas au domaine du visible (400 à 800 nm).

b. La valeur de la quantité de mouvement est donnée par la relation :

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{|\Delta\mathscr{E}|}{h \times \nu} = \frac{|\Delta\mathscr{E}|}{c}.$$

A.N. : $p = \dfrac{2{,}0 \times 10^{-15}}{3{,}00 \times 10^{8}} = 6{,}7 \times 10^{-24}$ J·s·m^{-1}.

18. Utiliser la relation entre énergie et fréquence

a. Longueur d'onde dans le vide :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

A. N. : $\lambda = \dfrac{3{,}0 \times 10^{8}}{2{,}4 \times 10^{9}} = 1{,}25 \times 10^{-1}$ m arrondi à 0,13 m.

Énergie des photons :

$$|\Delta\mathscr{E}| = h\nu.$$

A.N. : $|\Delta\mathscr{E}| = 6{,}63 \times 10^{-34} \times 2{,}4 \times 10^{9} = 1{,}6 \times 10^{-24}$ J ;

On divise par $1{,}60 \times 10^{-19}$ pour obtenir cette énergie en eV.

$$|\Delta\mathscr{E}| = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 2{,}4 \times 10^{9}}{1{,}60 \times 10^{-19}} = 9{,}95 \times 10^{-6}\,\text{eV}.$$

b. Pour un photon de longueur d'onde $\lambda = 600$ nm, son énergie est donnée par la relation :

$$|\Delta\mathscr{E}| = \frac{hc}{\lambda}.$$

$$|\Delta\mathscr{E}| = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{600 \times 10^{-9} \times 1{,}60 \times 10^{-19}}$$

$|\Delta\mathscr{E}| = h\nu = 2{,}1$ eV.

L'énergie d'un photon visible est beaucoup plus grande que celle d'un photon utilisé en Wi-Fi.

19. Interpréter l'effet Compton

a. Les rayons X sont des ondes électromagnétiques comme la lumière visible ; leurs longueurs d'onde sont plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible et des rayons ultraviolets.

b. Les particules mises en jeu sont d'une part un photon et d'autre part un électron de la cible.

c. Les rayons X se comportent comme des particules ayant une énergie et une quantité de mouvement.

Particules et ondes de matière (§2 du cours)

20. Connaître la dualité onde-particule

Une particule matérielle, par exemple un électron, présente des propriétés apparemment inconciliables. Il serait à première vue incongru d'affirmer qu'un électron a à la fois les propriétés d'une particule et celles d'une onde.

Pourtant, lors d'une expérience d'interférence, c'est ce que fait un électron : l'impact d'un électron est localisé sur un écran et confirme son caractère particulaire mais, l'impact d'un grand nombre d'électrons sur ce même écran fait apparaître la figure d'interférence, confirmant son caractère ondulatoire.

21. Appliquer la relation de Louis de Broglie

a. Pour l'électron, la longueur d'onde est :

$$\frac{h}{p_e} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{9{,}11 \times 10^{-31} \times 3{,}00 \times 10^{5}} = 2{,}43 \times 10^{-9}\ \text{m}.$$

Pour le proton, la longueur d'onde est :

$$\frac{h}{p_e} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{1{,}67 \times 10^{-27} \times 1{,}64 \times 10^{3}} = 2{,}42 \times 10^{-10}\ \text{m}.$$

b. Pour des ondes électromagnétiques, les longueurs d'onde correspondent au domaine des rayons X.

Dualité onde-particule (§3 du cours)

22. Citer une preuve expérimentale

Le caractère ondulatoire de la matière est significatif lorsqu'un faisceau d'électrons donne une figure de diffraction quand il est envoyé sur un cristal (expérience réalisée par Davisson et Germer en 1927). La diffraction par un cristal est observée avec d'autres particules matérielles : neutrons, atomes, molécules. On peut citer également l'obtention d'interférence avec des électrons, des atomes, etc.

23. Connaître la dualité de la lumière

a. À la date $t = 10$ s, la position de l'impact d'un photon semble aléatoire.

b. À la date $t = 500$ s, la figure qui apparaît est celle des interférences : des franges apparaissent.

c. Les zones les plus claires correspondent à une probabilité de présence maximale des photons alors que les plus sombres correspondent à une probabilité de présence minimale.

d. Dans cette expérience, le caractère ondulatoire des photons se manifeste lorsqu'ils sont en nombre suffisant, ce qui est réalisé à la date $t = 500$ s.

EXERCICES S'entraîner

24. Exercice résolu dans le manuel

25. Application de l'exercice résolu

1. $\lambda'_1 - \lambda_1 = \dfrac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta_1)$.

A. N. : $\lambda'_1 - \lambda_1 = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34}}{9{,}109 \times 10^{-31} \times 3{,}00 \times 10^{8}}(1 - \cos 60)$

$\lambda'_1 - \lambda_1 = 1{,}21 \times 10^{-12}$ m.

2. Si $\lambda'_2 - \lambda_2 = 2 \times (\lambda'_1 - \lambda_1)$ alors :

$1 - \cos\theta_2 = 2 \times (1 - \cos\theta_1)$

soit : $\cos\theta_2 = 2\cos\theta_1 - 1$ avec $\theta_1 = 60{,}0°$;

on obtient $\cos\theta_2 = 0$ et par suite $\theta_2 = 90{,}0°$.

3. Avec le même raisonnement que dans la question 2 :

$1 - \cos\theta_3 = 0{,}5 \times (1 - \cos\theta_1)$ soit :

$\cos\theta_3 = 0{,}5 + 0{,}5 \times \cos\theta_1$

A. N. : $\cos\theta_3 = 0{,}5 + 0{,}5 \times \cos 60 = 0{,}750$ et donc $\theta_3 = 41{,}1°$.

26. Exercice résolu dans le manuel

27. Application de l'exercice résolu

1. $|\Delta\mathscr{E}| = \dfrac{hc}{\lambda}$.

A. N. : $|\Delta\mathscr{E}| = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{0{,}78 \times 10^{-6} \times 1{,}60 \times 10^{-19}} = 1{,}6$ eV.

2. $\Delta\mathscr{E} \times \Delta t \geqslant \dfrac{h}{4\pi}$ soit $\Delta\mathscr{E} \geqslant \dfrac{h}{4\pi\Delta t}$ avec :

$\dfrac{h}{4\pi\Delta t} = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34}}{4\pi \times 2{,}7 \times 10^{8}} = 1{,}955 \times 10^{-27}$ J $= 1{,}2 \times 10^{-8}$ eV.

3. L'énergie du niveau excité est égale à l'énergie du niveau fondamental plus l'énergie du photon émis ; elle est donnée avec la précision :

$\dfrac{\Delta\mathscr{E}}{\mathscr{E}} = \dfrac{1{,}2 \times 10^{-8}}{1{,}6} = 7{,}6 \times 10^{-9} \cong 10^{-8}$.

L'énergie du niveau excité est donc définie avec une très grande précision.

28. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, communiquer.**

a. La longueur d'onde associée à une particule matérielle est donnée par la relation :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

h est la constante de Planck et p la quantité de mouvement de la particule de masse m animée de la vitesse v.

$p = mv$ et $\mathscr{E}_c = \dfrac{1}{2}mv^2 = \dfrac{1}{2}\dfrac{p^2}{m}$ soit $p = \sqrt{2m\mathscr{E}_c}$.

Soit :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathscr{E}_c}}.$$

b. Les unités à employer sont les unités SI : l'énergie doit être en joule.

$\mathscr{E}_c = 5{,}0 \times 10^{-2} \times 1{,}60 \times 10^{-19}$ J.

$$\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1{,}67 \times 10^{-27} \times 5{,}0 \times 10^{-2} \times 1{,}60 \times 10^{-19}}}$$

$\lambda = 1{,}3 \times 10^{-10}$ m $= 0{,}13$ nm.

c. $\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{2m_e\mathscr{E}_{ce}}} = \dfrac{h}{\sqrt{2m_n\mathscr{E}_{cn}}}$ d'où $\mathscr{E}_{ce} = \dfrac{m_n}{m_e}\mathscr{E}_{cn}$.

A. N. : $\mathscr{E}_{ce} = \dfrac{1{,}67 \times 10^{-27}}{9{,}11 \times 10^{-31}} \times 5{,}0 \times 10^{-2} = 92$ eV.

29. Relation de de Broglie pour un ion

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. $\lambda = \dfrac{h}{p}$. De la relation de de Broglie, on déduit :

$$\dim h = \dim(\text{énergie}) \times \text{T}.$$

D'après la définition de l'énergie cinétique $\mathscr{E} = \dfrac{1}{2}mv^2$:

$$\dim(mc) = \dim\left(\frac{\frac{1}{2}mc^2}{c}\right)$$

$$\dim(mc) = \dim(p) = \frac{\dim(\text{énergie})}{\text{L} \times \text{T}^{-1}}.$$

Donc :

$$\dim\left(\frac{h}{p}\right) = \frac{\dim(\text{énergie}) \times \text{T} \times \text{L} \times \text{T}^{-1}}{\dim(\text{énergie})} = \text{L}.$$

Le rapport $\dfrac{h}{p}$ a la dimension d'une longueur tout comme la longueur d'onde, la relation de de Broglie est cohérente au niveau dimensionnel.

b. Par définition : $p = mv$ et $\mathscr{E}_c = \dfrac{1}{2}mv^2 = \dfrac{1}{2}\dfrac{p^2}{m}$.

Soit $p = \sqrt{2m\mathscr{E}_c}$.

La longueur d'onde associée est :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathscr{E}_c}}.$$

A. N. :

$$\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 50 \times 1{,}66 \times 10^{-27} \times 5{,}0 \times 10^{-2} \times 1{,}60 \times 10^{-19}}}$$

$= 1{,}8 \times 10^{-11}$ m.

30. Extraire et exploiter des informations

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

a. Le point de coordonnées ($\mathscr{E}_c = 100$ keV, $Z = 50$) est dans le domaine de l'effet photoélectrique : on observe l'effet photoélectrique lorsque les photons d'énergie 100 keV interagissent avec cette cible.

Le point de coordonnées ($\mathscr{E}_c = 1$ MeV, $Z = 50$) est dans le domaine de l'effet Compton : on observe l'effet Compton lorsque les photons d'énergie 1 MeV interagissent avec cette cible.

b. Il existe un point d'abscisse 500 keV situé sur la ligne d'équiprobabilité des deux effets. Il est donc possible d'obtenir avec la même probabilité l'effet Compton et l'effet photoélectrique avec des photons d'énergie 500 keV. L'ordonnée du point est $Z = 40$ (échelle peu précise).
Les deux effets peuvent être obtenus simultanément pour une cible de numéro atomique $Z = 40$.
c. La troisième interaction est l'effet de matérialisation. Elle intervient avec des photons très énergétiques (un photon donne alors en électron et un positon).

31. In English Please

> COMPÉTENCES : **Analyser, valider, communiquer**.

a. « Work function » est l'énergie minimale que l'on doit fournir pour extraire un électron du métal : c'est le travail d'extraction.
b. La lumière est décrite sous son aspect particulaire : le photon.
c. Pour qu'il y ait effet photoélectrique, l'énergie du photon doit être supérieure ou égale au travail d'extraction du matériau :
$\mathscr{E} = h\nu \geqslant$ « work function »

A. N. : $\mathscr{E} = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 1{,}1 \times 10^{15}}{1{,}60 \times 10^{-19}} = 4{,}56$ eV.

Deux valeurs du tableau sont inférieures à 4,56 eV. Elles correspondent aux deux métaux que l'on peut choisir : le baryum (Ba) et l'aluminium (Al).

32. Diffraction de grains de sable

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

Le phénomène de diffraction fait intervenir le rapport $\dfrac{\lambda}{a}$, a étant la taille de l'obstacle ou de l'ouverture.
La longueur d'onde associée à un grain de sable est donné par la relation de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ avec } p = mv.$$

A. N. : pour un grain de sable de masse $m = 1$ mg et de vitesse $v = 1\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{1 \times 1 \times 10^{-6}} = 7 \times 10^{-28}\,\text{m}.$$

En supposant $a \leqslant 100\ \lambda$ pour avoir diffraction, $a \leqslant 6 \times 10^{-26}$ m soit un ordre de grandeur de 10^{-25} m. Il n'existe pas « d'objet » de cette dimension permettant de mettre en évidence par diffraction le caractère ondulatoire d'un grain de sable.

33. Aspect particulaire de la lumière

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

a. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$\mathscr{E} = h\nu \quad \text{avec} \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{soit} \quad \mathscr{E} = \frac{hc}{\lambda}.$$

On en déduit que la longueur d'onde dans le vide est :

$$\lambda = \frac{hc}{\mathscr{E}}.$$

La longueur d'onde seuil du tungstène, notée λ_0, est celle d'un photon d'énergie :

$$\mathscr{E}_0 = 4{,}49 \text{ eV}.$$

A. N. : l'énergie est à exprimer en joule :

$$\lambda_0 = \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}00 \times 10^{8}}{4{,}49 \times 1{,}60 \times 10^{-19}}$$

$\lambda_0 = 2{,}77 \times 10^{-7}$ m = 277 nm.

b. D'après le texte, le photon doit apporter une énergie supérieure au travail d'extraction :

$$\mathscr{E} \geqslant \mathscr{E}_0$$

$$\frac{hc}{\lambda} \geqslant \frac{hc}{\lambda_0} \quad \text{donc} \quad \lambda \leqslant \lambda_0.$$

La longueur d'onde doit être inférieure à la longueur d'onde seuil.

34. Diffraction des molécules

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

La masse d'une molécule est calculée à partir de sa masse molaire et de la constante d'Avogadro N_A :

$$m = \frac{M(C_{60})}{N_A} = \frac{60M(C)}{N_A}.$$

Des relations $\lambda = \dfrac{h}{p}$ et $p = mv$, on en déduit la vitesse v des molécules :

$$v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{h}{\lambda} \times \frac{N_A}{60M(C)}$$

$$= \frac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 6{,}02 \times 10^{23}}{60 \times 12 \times 10^{-3} \times 2{,}5 \times 10^{-12}} = 222\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

35. Principe de complémentarité

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, valider.**

a. Deux fentes fines et parallèles sont éclairées par une source de lumière ; les deux fentes jouent le rôle de deux sources cohérentes. Le phénomène d'interférence apparaît dans la zone de recouvrement des deux faisceaux et des franges d'interférence apparaissent sur un écran placé dans cette zone.
b. Dans cette expérience, la source de lumière est particulière puisqu'elle émet des photons un par un à intervalles réguliers. Les photons se comportent comme des particules localisées spatialement lorsqu'ils arrivent sur l'écran. Ils montrent un comportement ondulatoire en formant peu à peu la figure d'interférence. Dans cette expérience d'interférence, on ne peut pas prévoir la position de l'impact d'un photon sur l'écran mais lorsque leur nombre est important, ils respectent une loi de probabilité et forment le motif caractéristique des franges d'interférence ; les franges s'interprètent comme une alternance de zones où le photon a une probabilité de présence minimale ou maximale.
c. Il n'est pas possible de déterminer par quelle fente passe un photon ; toute tentative détruit la figure d'interférence ; la source fournissant des photons un par un, chaque photon semble être passé simultanément par les deux fentes ce qui n'est pas envisageable pour une particule indivisible.

36. ★ La longueur d'onde Compton

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser.**

a. $\dim h = \dim(\text{énergie}) \times T = \dim(\text{force}) \times L \times T$
$= M \times L \times T^{-2} \times L \times T$
$= M \times L^2 \times T^{-1}$

$\dim mc = M \times L \times T^{-1}$

$\dim \dfrac{h}{m_e c} = \dfrac{M \times L^2 \times T^{-1}}{M \times L \times T^{-1}} = L.$

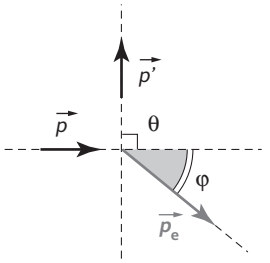
A. N. :

$\lambda_{Compton} = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34}}{9{,}11 \times 10^{-31} \times 3{,}00 \times 10^{8}} = 2{,}43 \times 10^{-12}$ m.

b. D'une part, la lumière visible correspond à des longueurs d'onde dans le vide comprises entre 400 nm et 800 nm, soit un ordre de grandeur de 10^{-6} m.
D'autre part, la relation donnant $\Delta\lambda$ montre que l'ordre de grandeur de $\Delta\lambda$ est de 10^{-12} m (maximum égal à $\lambda_{Compton}$ pour $\theta = \pm\dfrac{\pi}{2}$).

L'écart entre les deux ordres de grandeur est très important et la variation de longueur d'onde sera difficile à mettre en évidence.
L'expérience ne sera pas pertinente en lumière visible, elle le sera avec des rayons X dont les longueurs d'onde sont plus faibles que celles de la lumière visible.

c.



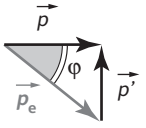
Avant la collision, l'électron étant supposé immobile, sa quantité de mouvement est nulle ; la quantité de mouvement du système {photo – électron} est : $\vec{p}_{Avant} = \vec{p} + \vec{0}$.

Après la collision, la quantité de mouvement du système est : $\vec{p}_{Après} = \vec{p}' + \vec{p}_e$.

La conservation de la quantité de mouvement est donc :

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_e .$$

Cette relation vectorielle est schématisée ci-contre.



Dans le triangle rectangle ainsi tracé,

$p_e = \sqrt{p^2 + p'^2}$ et $\tan\varphi = \dfrac{p'}{p}$.

A. N. :

$p_e = \sqrt{(9{,}66 \times 10^{-24})^2 + (9{,}34 \times 10^{-24})^2} = 13{,}4 \times 10^{-24}$ J·s·m^{-1}

$\tan\varphi = \dfrac{9{,}34 \times 10^{-24}}{9{,}66 \times 10^{-24}}$ d'où $\varphi = 44{,}0°$.

37. ★ S'auto-évaluer

La longueur d'onde associée à une particule matérielle est donnée par la relation : $\lambda = \dfrac{h}{p}$.

h est la constante de Planck et p la quantité de mouvement de la particule de masse m animée de la vitesse v.

$p = mv$ et $\mathscr{E}_c = \dfrac{1}{2}mv^2 = \dfrac{1}{2}\dfrac{p^2}{m}$ soit $p = \sqrt{2m\mathscr{E}_c}$

soit : $\lambda = \dfrac{h}{p} = \dfrac{h}{\sqrt{2m\mathscr{E}_c}}$.

Les unités à employer sont les unités SI : l'énergie doit être en joule.

$$\mathscr{E}_c = 60 \times 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{J}.$$

$$\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9{,}11 \times 10^{31} \times 60 \times 1{,}60 \times 10^{-19}}}$$

$\lambda = 1{,}6 \times 10^{-10}$ m $= 0{,}16$ nm.

La longueur d'onde dans le vide des rayons X de fréquence $v = 1{,}90 \times 10^{18}$ Hz est :

$\lambda = \dfrac{c}{v} = \dfrac{3{,}00 \times 10^{8}}{1{,}90 \times 1018} = 1{,}60 \times 10^{-10}$ m $= 0{,}160$ nm.

La diffraction est un phénomène caractéristique d'une onde ; la diffraction du faisceau d'électrons confirme que l'on peut associer une onde à une particule matérielle.
De plus, la figure de diffraction est identique lorsqu'elle est obtenue :
– avec des rayons X de longueur d'onde 0,160 nm ;
– avec des électrons dont la longueur d'onde associée calculée avec la relation de de Broglie est égale à 0,160 nm, validant ainsi cette relation.

38. ★ Interférences atomiques

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

a. La mélasse optique refroidit et immobilise les atomes.

b. $\lambda_{Ne} = 15$ nm.

$\lambda = \dfrac{h}{p}$ et $p = mv$ d'où $v = \dfrac{h}{m\lambda} = \dfrac{h}{\lambda} \times \dfrac{N_A}{M}$.

A.N. : $v = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34} \times 6{,}02 \times 10^{23}}{20 \times 10^{-3} \times 15 \times 10^{-9}}$
$= 1{,}3$ m·s^{-1}.

c. De $i = \dfrac{\lambda D}{a}$, on déduit : $\lambda = \dfrac{ai}{D}$.

A. N. : $\lambda = \dfrac{6 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-3}}{0{,}85}$
$= 1{,}4 \times 10^{-8}$ m $= 14$ nm.

La valeur est comparable à la valeur $\lambda_{Ne} = 15$ nm.

d. L'aspect particulaire des atomes se manifeste par l'impact localisé sur l'écran. L'aspect ondulatoire se manifeste par la répartition des points d'impact sur l'écran qui forment des franges comme une onde.
La densité en un point de l'écran est proportionnelle à la probabilité qu'à un atome de se retrouver en ce point.

39. ★ L'effet photoélectrique

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. K n'est pas éclairée : l'intensité $I = 0$; entre A et K, il n'y a pas de contact électrique.

K est éclairée : l'intensité n'est pas nulle lorsque la longueur d'onde est inférieure à une certaine valeur.

L'interprétation se fait avec le modèle particulaire de la lumière : les photons apportent de l'énergie pour extraire les électrons de la cathode, leur énergie doit être supérieure ou égale à une valeur caractéristique du matériau de la cathode.

L'énergie d'un photon est :

$$\mathscr{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\mathscr{E} \geqslant \mathscr{E}_0$$

soit : $\dfrac{hc}{\lambda} \geqslant \dfrac{hc}{\lambda_0}$

donc : $\lambda \leqslant \lambda_0$.

K est éclairée, l'intensité I augmente.

Lorsque l'on augmente l'intensité lumineuse, le nombre de photons reçus par la cathode augmente, le nombre d'électrons émis augmente et l'intensité électrique I augmente.

b. À l'aide de l'animation, la longueur d'onde maximale donnant naissance à l'effet photoélectrique est d'environ 580 nm.

40. ★★ Vitesse et émission spontanée

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider, communiquer.**

a. $p = \dfrac{h\nu}{c} = \dfrac{h}{\lambda}$

b. La quantité de mouvement s'exprime par la relation $p = mv$.

On a donc : dim $p = \mathrm{MLT^{-1}}$.

$h\nu$ est une énergie comme mc^2 donc :

dim $(h\nu) = \mathrm{ML^2T^{-2}}$.

c a la dimension d'une vitesse : dim $c = \mathrm{LT^{-1}}$.

$$\dim\left(\frac{h\nu}{c}\right) = \frac{\mathrm{ML^2T^{-2}}}{\mathrm{LT^{-1}}} = \mathrm{MLT^{-1}}.$$

La relation est donc bien homogène.

c. L'atome de rubidium constitue un système isolé comme l'indique l'énoncé. La quantité de mouvement d'un système isolé est constante. Avant l'émission, cette quantité de mouvement est nulle puisque l'atome est immobile.

Après la désexcitation de l'atome, le photon émis part avec une quantité de mouvement $\vec{p}_{\text{photon}}$. Pour que la quantité de mouvement de l'ensemble reste nulle, il faut que l'atome recule avec une quantité de mouvement $\vec{p}_{\text{atome}}$ telle que :

$$\vec{p}_{\text{photon}} + \vec{p}_{\text{atome}} = \vec{0}.$$

Les deux vecteurs quantité de mouvement sont opposés. L'atome part sur la même direction que le photon mais en sens opposé :



d. En valeur, ces quantités de mouvement sont égales : $p_{\text{photon}} = p_{\text{atome}}$.

$\dfrac{h}{\lambda} = mv$ donc $v = \dfrac{h}{m\lambda}$

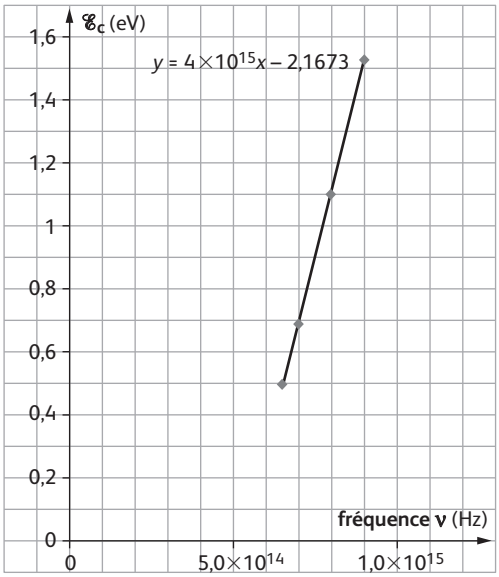
A. N. : $v = \dfrac{6{,}63 \times 10^{-34}}{1{,}45 \times 10^{-25} \times 0{,}78 \times 10^{-6}} = 5{,}9 \times 10^{-3}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

41. ★★ L'effet photoélectrique par Millikan

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

a. $\mathscr{E}_c = \mathscr{E} - \mathscr{E}_0$ soit : $\mathscr{E}_c = h\nu - \mathscr{E}_0$ avec $\mathscr{E}_c$ l'énergie cinétique de l'électron émis ; $\mathscr{E}$ l'énergie du photon incident de fréquence ν et $\mathscr{E}_0$ le travail d'extraction.

b.



c. La représentation de $\mathscr{E}_c$ en fonction de la fréquence ν est une droite d'équation $y = ax + b$.

L'équation établie en **a.** peut s'écrire :

$$y = hx - \mathscr{E}_0$$

en posant $y = \mathscr{E}_c$ et $x = \nu$. Le résultat est conforme à la relation d'Einstein.

d. La fréquence seuil correspond à $\mathscr{E}_c = 0$. La lecture graphique donne : $\nu_0 = 5{,}4 \times 10^{14}$ Hz.

La longueur d'onde seuil dans le vide est donnée par :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{3{,}00 \times 10^8}{5{,}4 \times 10^{14}} = 0{,}56 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}.$$

Le travail d'extraction $\mathscr{E}_0$ est obtenu graphiquement :

$$y = -\mathscr{E}_0 \text{ ; pour } x = 0 : \mathscr{E}_0 = 2{,}2\ \mathrm{eV}.$$

Le coefficient directeur de la droite est égal à la valeur de la constante de Planck, h exprimé en joule par seconde :

$$h = 4{,}0 \times 10^{-15} \times 1{,}60 \times 10^{-19} = 6{,}4 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}.$$

La valeur admise est $6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s.

e. La représentation pour le zinc de $\mathscr{E}_c$ en fonction de la fréquence ν est une droite parallèle à la précédente (même coefficient directeur h) ; elle coupe l'axe des x à l'abscisse :

$x = \nu_0 = 8{,}1 \times 10^{14}$ Hz, fréquence seuil de ce métal.

42. ★★ Diffraction de neutrons

> COMPÉTENCES : **Connaître, s'approprier, analyser, valider, communiquer.**

a. Les neutrons libres n'appartiennent pas à un noyau. Ils n'existent pas dans la nature car leur durée de vie est courte.

b. ${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\overrightarrow{v_e}$

c. La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd dit fissile, est scindé en deux sous l'impact d'un neutron.

d. Les atomes d'hydrogène de la molécule d'eau lourde sont des isotopes de l'hydrogène ${}^{1}_{1}H$. La formule de cet isotope est ${}^{2}_{1}H$.

Les neutrons sont ralentis par choc. Au cours des collisions avec les molécules d'eau lourde, ils transfèrent une partie de leur énergie cinétique à la cible (molécule d'eau).

e. D'après la relation de Louis de Broglie, $\lambda = \frac{h}{p}$ avec $p = mv$; plus la vitesse est grande, plus la longueur d'onde est petite. Pour avoir une longueur d'onde adaptée à la diffraction, il faut diminuer la valeur de v.

f. La diffraction par les neutrons permet de déterminer les positions des noyaux atomiques dans un cristal.

g. $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathscr{E}_c}}$.

$\mathscr{E}_c = 100 \times 10^{-3} \times 1{,}60 \times 10^{-19}$ J.

$$\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1{,}67 \times 10^{-27} \times 100 \times 10^{-3} \times 1{,}60 \times 10^{-19}}}$$

$= 9{,}07 \times 10^{-11}$ m.

Ces neutrons sont adaptés à l'étude par diffraction d'un cristal dans lequel l'ordre de grandeur des distances interatomiques est de 10^{-10} m.

43. Microscope électronique à balayage

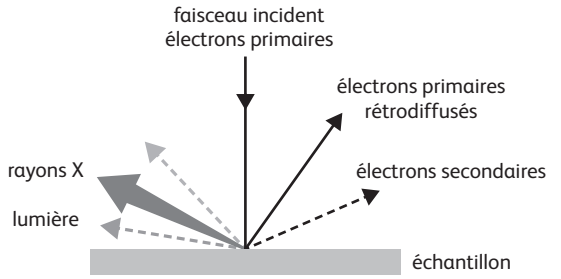
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Proposition de synthèse de documents :

Un microscope est un instrument qui donne une image agrandie d'un objet pour permettre l'observation de détails non visibles à l'œil nu.

Le microscope électronique utilise non pas un faisceau lumineux comme un microscope optique mais un faisceau d'électrons dont la longueur d'onde de l'onde associée est inférieure aux longueurs d'onde des ondes lumineuses. La limite de résolution qui est proportionnelle à la longueur d'onde est ainsi améliorée : on peut distinguer des détails distants de 200 nm avec un microscope optique alors que des détails distants de 0,4 nm peuvent être distingués avec un microscope électronique à balayage (MEB).

Microscope optique et microscope électronique donnent des images de nature différente ; le microscope optique donne une image plane et agrandie de l'objet, le microscope électronique fournit des images reconstituées point par point à partir des informations fournies par différents détecteurs.



Lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon dans un microscope électronique, on étudie essentiellement :

– les électrons secondaires, électrons arrachés à l'échantillon ;

– les électrons rétrodiffusés, électrons primaires qui pénètrent dans l'échantillon puis en ressortent ;

– les photons X produits par désexcitation des atomes.

L'analyse des électrons secondaires fournit une image en relief de la surface de l'échantillon alors que celle des électrons rétrodiffusés renseigne sur la composition chimique de l'échantillon. Le détecteur de rayons X complète l'analyse chimique en identifiant les différents éléments chimiques.

Ainsi, le microscope électronique à balayage réalise des images en relief de la surface des matériaux solides avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre et analyse leur composition. Citons quelques exemples de son utilisation :

– étude des microstructures de matériaux en sciences des matériaux ;

– observation et analyse des minéraux en géologie ;

– observation des microorganismes comme des bactéries ou des virus en biologie ;

– observation des composants en microélectronique et en nanotechnologie.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

44. ONDES ET PARTICULES

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, valider.**

1. D'après le document 1, le point A est au centre d'une frange brillante. Les interférences observées en A sont des interférences constructives.

Le point B est au centre d'une frange sombre. Les interférences observées en B sont destructives.

2. Les interférences constructives observées en A sont obtenues pour des ondes en phase donc pour les ondes (a) et (c) ; les interférences destructives sont obtenues pour des ondes en opposition de phase donc pour les ondes (a) et (b) ou les ondes (b) et (c).

3. a. Sur le document 3, on remarque que pour une cinquantaine d'impacts les positions semblent

aléatoires. Il n'est donc pas possible de prévoir la position d'un électron, le phénomène pourra être interprété en terme de densité de probabilité de présence pour un grand nombre d'impacts.

b. À partir de 1 000 impacts, on voit se dessiner sur les figures du document 3 les figures d'interférences, avec l'équivalent de franges sombres qui correspondent à un faible nombre d'impacts, de franges brillantes qui correspondent à un grand nombre d'impacts.

Le phénomène d'interférence est caractéristique du comportement ondulatoire des électrons.

Pour un faible nombre d'impacts, les impacts semblent aléatoires et traduisent le caractère corpusculaire (particulaire) des électrons.

4. a. D'après la relation de de Broglie, $p = \frac{h}{\lambda}$ par définition, $p = m_e \times v$ et par suite :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \times v}.$$

A.N. : $\lambda = \frac{6{,}6 \times 10^{-34}}{9{,}1 \times 10^{-31} \times 1{,}3 \times 10^{8}} = 5{,}6 \times 10^{-12}$ m.

Soit $\lambda = (5{,}6 \pm 0{,}5) \times 10^{-12}$ m.

Sur le document 2, pour 5 000 impacts, on détermine l'interfrange : $4i = 8{,}0$ µm soit $i = 2{,}0$ µm. L'interfrange est par ailleurs donné par la relation $i = \frac{\lambda D}{b}$ soit $\lambda = \frac{i \times b}{D}$.

A. N. : $\lambda = \frac{2{,}0 \times 10^{-6} \times 0{,}8 \times 10^{-6}}{35{,}0 \times 10^{-2}} = 4{,}57 \times 10^{-12}$ m.

On utilise la formule donnée pour calculer l'incertitude sur la longueur d'onde :

$$U(\lambda) = \lambda \times \sqrt{\left(\frac{U(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{U(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{U(D)}{D}\right)^2}$$

$$= 4{,}57 \times 10^{-12} \sqrt{\left(\frac{0{,}2}{2{,}0}\right)^2 + \left(\frac{0{,}2}{0{,}8}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{35}\right)^2}$$

$$= 1{,}23 \times 10^{-12} \text{ m} = 1{,}3 \times 10^{-12} \text{ m}.$$

(Arrondir à l'excès avec un ou deux chiffres significatifs au maximum.)

$\lambda = (4{,}6 \pm 1{,}3) \times 10^{-12}$ m.

On avait par le calcul : $\lambda = (5{,}6 \pm 0{,}5) \times 10^{-12}$ m. Ces deux valeurs sont cohérentes car les deux intervalles de confiance se recoupent.

b. Le phénomène observé est la diffraction de l'onde ; l'onde de matière traverse ici une ouverture de petite dimension.

c. D'après le schéma de l'expérience sur le document 4, $\tan\theta = \frac{OM}{D}$ et avec un angle exprimé en radians, d'après l'approximation des petits angles, $\theta = \frac{OM}{D}$.

On mesure *OM* sur la figure de densité de probabilité de présence des électrons du document 4, $OM = 8{,}0$ µm soit $\theta = \frac{8{,}0 \times 10^{-6}}{35{,}0 \times 10^{-2}} = 2{,}3 \times 10^{-5}$ rad.

On sait par ailleurs que $\theta = \frac{\lambda}{a}$ et par suite $\lambda = \theta \times a$.

A. N. :

$\lambda = 2{,}3 \times 10^{-5} \times 0{,}2 \times 10^{-6} = 4{,}6 \times 10^{-12}$ m $= 5 \times 10^{-12}$ m.

On obtient un ordre de grandeur de 10^{-12} m identique à l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde de matière déterminée précédemment.

45. PROTONS ÉNERGÉTIQUES

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser, valider.**

1. $\mathscr{E}_c = \frac{1}{2} m_p v^2$ avec $v = \frac{c}{10}$ (le proton est animé d'une vitesse de valeur égale à 10 % de la célérité de la lumière dans le vide) :

$$\mathscr{E}_c = \frac{1}{2} \times m_p \times \left(\frac{c}{10}\right)^2.$$

A. N. :

$$\mathscr{E}_c = \frac{1}{2} \times 1{,}673 \times 10^{-27} \times \left(\frac{3{,}00 \times 10^{-8}}{10}\right)^2 = 7{,}5 \times 10^{-13} \text{ J}.$$

$$\mathscr{E}_c = \frac{7{,}5 \times 10^{-13}}{1{,}602 \times 10^{-13}} = 4{,}7 \text{ MeV}.$$

2. D'après la question **1**, les protons classiques les plus énergétiques ont une énergie cinétique de 4,7 MeV. Le document 2 nous indique que les protons les plus énergétiques des rayons cosmiques ont une énergie de 10 GeV, supérieure à 4,7 MeV, ces protons sont donc relativistes.

3. a. $p = m_p \times v = m_p \times \frac{c}{10}$.

A.N. : $p = 1{,}673 \times 10^{-27} \times \frac{3{,}00 \times 10^{-8}}{10} = 5{,}0 \times 10^{-20}$ kg·m·s^{-1}.

b. D'après la relation de de Broglie, $\lambda = \frac{h}{p}$.

A. N. : $\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{5{,}0 \times 10^{-20}} = 1{,}3 \times 10^{-14}$ m.

46. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

Une source de photons uniques

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, communiquer.**

1. Voir le tableau page suivante.

2. La figure observée sur l'écran ne présente aucune structure cohérente lorsque le nombre de photons est faible. On ne peut pas prévoir l'impact des photons, la figure présente un aspect aléatoire. Les photons ont un comportement particulaire.

Lorsque le nombre de photons devient important, la figure d'interférences se dessine sur l'écran : des franges brillantes correspondent à de fortes probabilités de présence des photons, des franges sombres à des probabilités de présence minimales.

La figure obtenue montre alors le caractère ondulatoire du photon.

La combinaison de ces deux aspects illustre la dualité onde-particule de la lumière.

Tableau de la question 1 de l'exercice 46 :

Qu'est-ce qu'un centre NV ? Est-il possible d'isoler un centre NV ?	Quel est le phénomène utilisé pour que le centre NV émette un photon ? Quelle est la longueur d'onde du photon émis ?	Quel est le rôle du dispositif de filtrage ?	Cette source de lumière est couramment nommée « source de photon unique ». Justifier ce nom.
Un centre NV est un défaut de la maille cristalline du diamant dû à la présence d'un atome d'azote (N) à coté d'un emplacement vacant (V).	Une impulsion laser, ultra brève, est envoyée sur un centre NV qui est alors excité. Lorsque qu'il se désexcite, il émet un photon. La longueur d'onde du photon émis est de 690 nm.	Le dispositif de filtrage laisse passer les photons de longueur d'onde 690 nm (rouge) et arrêtent les photons qui excitent les centres NV.	La source est dite « source de photon unique » car elle fournit un seul photon par impulsion laser : un seul centre présent dans un nanocristal est excité et un photon unique est alors émis. Le nom « source de photon unique » est un peu ambigu car en réalité des millions de photons sont émis, mais un par un, jamais deux ou plus ensemble, ce qui justifie le terme « photon unique ».

CHAPITRE

20

AGIR

Enjeux énergétiques et environnementaux

> Manuel pages 448 à 471

Choix pédagogiques

Ce chapitre introduit le thème « Enjeux énergétiques et environnementaux » de la troisième partie du programme « Défis du XXIe siècle ». Il regroupe physique et chimie afin de répondre à des questions d'actualité. Ce chapitre a une organisation particulière puisque les compétences attendues sont essentiellement « Extraire et exploiter des informations ». Sa partie cours se résume à un essentiel ; par ailleurs, plus d'activités sont abordées que dans les chapitres classiques et les exercices sont de type documentaire. Cette absence de connaissances exigibles souligne l'aspect introductif au thème « Défis du XXIe siècle ». Ce chapitre est aussi l'occasion d'exercer les élèves à rédiger des synthèses de documents.

Une première activité documentaire portant sur une énergie renouvelable permet de saisir la nécessité de changer la nature des ressources énergétiques.

Une deuxième activité documentaire met l'accent sur la réduction de la consommation d'énergie finale dans les secteurs du bâtiment et des transports.

La troisième activité documentaire introduit la chimie durable. La limitation des déchets dans une transformation chimique est quantifiée avec la notion d'économie d'atomes. Cette activité précise aussi les principes de la « chimie verte ».

La quatrième activité sert de trait d'union entre l'aspect énergétique, du point de vue physique, vu dans les deux premières activités, et les économies d'énergie dans l'industrie chimique.

La cinquième activité apporte une solution pour limiter l'effet de serre et envisage la valorisation du dioxyde de carbone en tant que réactif chimique.

La dernière activité se présente sous la forme d'une démarche d'investigation. Elle permet aux élèves de réinvestir leurs connaissances en cinétique (chapitre 12) grâce à l'étude d'une étape de l'obtention du bioéthanol.

Des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

L'Orne est le premier département français à se doter de voies de circulation solaires.

Cette innovation pourrait-elle répondre aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels ?

Aujourd'hui, particuliers et entreprises peuvent produire de l'électricité à partir de panneaux solaires installés sur les toits de leurs bâtiments. Afin d'augmenter la capacité de production d'énergie électrique « propre » par le solaire, il faut augmenter les surfaces recouvertes par des panneaux solaires. Cette contrainte constitue l'inconvénient majeur de l'exploitation de l'énergie solaire. Il fallait donc trouver un moyen de multiplier cette surface. Or, la France possède un réseau routier dense. C'est pourquoi l'idée des routes solaires a été approfondie. Depuis peu, des prototypes sont installés en France, le premier étant situé dans l'Orne.

Grâce à ce questionnement, les élèves comprendront que des projets scientifiques innovants sont continuellement réalisés afin d'apporter une réponse aux problématiques énergétiques et environnementales contemporaines.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Étude d'un projet de parc éolien offshore

Commentaires

La Bretagne est une presqu'île énergétique, c'est-à-dire qu'il n'y a aucune centrale nucléaire. Lorsque de gros appels d'électricité se produisent en période de froid rigoureux, EDF est amené à pratiquer des coupures pour délester. Il faut donc que de nouvelles ressources émergent.

Le document 1 est constitué d'un texte présentant l'évolution générale de la production énergétique en Europe. Ce texte est accompagné d'un graphique à interpréter, d'une photographie avec une carte de la Bretagne ainsi que de la chaîne énergétique complète d'une éolienne à mettre en parallèle avec la question 4 du QCM « Se tester pour commencer » en ouverture de chapitre.

Le document 2 présente schématiquement et simplement le fonctionnement d'un parc éolien en mer. Enfin, le document 3 développe quelques avantages et inconvénients des parcs offshore.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Les usines marémotrices et les éoliennes offshore (doc. 1) sont deux exemples d'exploitation de l'énergie marine. (Il y a également les hydroliennes ou moulins sous-marins et les barrages flottants pour exploiter l'énergie de la houle.)

ANALYSER

2. a. La production d'électricité primaire augmente progressivement depuis 2001 et a été multipliée par 2,7. Cette augmentation participe à celle de la production d'énergie totale qui atteint, en 2010, environ 590 ktep, soit 8,3 % des besoins couverts contre 5,5 % en 2001.
Rappel : l'électricité primaire est l'électricité d'origine nucléaire, hydraulique, éolienne, solaire, photovoltaïque ou géothermique.
b. D'après le texte, la Bretagne a produit 6 910 GWh d'énergie pour sa consommation finale en 2010.
Or, 1 Wh = $3{,}60 \times 10^3$ J d'où :
$\mathscr{E} = 6\,910$ GWh $= 6\,910 \times 3{,}60 \times 10^3$ GJ.
De plus, on sait que 1 tep = 42 GJ.
On en déduit que :

$$\mathscr{E} = \frac{6\,910 \times 3{,}6 \times 10^3}{42}$$

$$\mathscr{E} = 594 \times 10^3 \text{ tep} = 594 \text{ ktep}.$$

D'après le graphique, l'énergie produite en 2010 vaut environ 590 ktep.
Les deux valeurs sont cohérentes.

RÉALISER

3. Une turbine offshore ayant une puissance moyenne de 5,0 MW peut produire $\mathscr{E}$ = 15 GWh d'énergie électrique par an.
La relation $\mathscr{E} = \mathscr{P} \times \Delta t$ entraîne :

$$\Delta t = \frac{15 \times 3{,}6 \times 10^{12}}{5{,}0 \times 10^6}$$

$$\Delta t = 11 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\Delta t = \frac{11 \times 10^6}{3\,600} \text{ h} = 3\,055 \text{ h} = 3{,}0 \times 10^3 \text{ h}.$$

VALIDER

4. a. L'éolienne ne fonctionne à pleine puissance que 45 % du temps d'après le document 2 :

$$\Delta t = 0{,}45 \times 3{,}0 \times 10^3 = 1{,}35 \times 10^3 \text{ h} = 56 \text{ j}.$$

Pour qu'une telle éolienne produise 15 GWh d'électricité, il faut qu'elle fonctionne environ 56 jours par an, ce qui est peu. On peut donc supposer que cette éolienne fonctionnera sur une durée plus longue et permettra de produire davantage d'énergie.
b. En 2010, la Bretagne ne couvrait que 8,3 % de ses besoins en énergie. L'installation des 600 éoliennes offshore doit permettre d'atteindre une puissance de 3 GW, soit l'équivalent de deux réacteurs nucléaires. Ce projet devrait aider la région à obtenir son indépendance énergétique.
Il ne faut pas non plus sous-estimer les avantages et les inconvénients d'un parc éolien.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Économies d'énergie au quotidien : habitat et transport

Commentaires

Des réflexions sont menées afin de faire des économies d'énergie dans les deux domaines les plus énergivores, à savoir l'habitat et les transports.
Cette activité est constituée de deux parties : les documents 1 et 2 font référence au secteur de l'habitat, tandis que le document 3 s'intéresse à celui des transports. Les questions sont l'occasion de faire réfléchir les élèves à une unité, le $kWh_{ep} \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}$, qu'ils n'ont pas encore eu l'occasion d'approcher. Un bilan énergétique est demandé.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. En 2004, le secteur du bâtiment représentait 43,5 % de la consommation d'énergie française, ce qui est très important. Le Grenelle de l'environnement impose une réduction de la consommation énergétique des bâtiments.
b. Le solaire, la géothermie et la biomasse sont des ressources d'énergie renouvelables permettant de produire de l'énergie domestique. Il y a également l'éolien.
c. La consommation de carburants devrait diminuer dans les trente prochaines années. L'utilisation du pétrole comme carburant devrait aussi diminuer, du fait de sa rareté et de son coût. Le moteur thermique sera de moins en moins utilisé au profit du moteur électrique, du moteur hybride ou du moteur utilisant une pile à hydrogène. L'utilisation des biocarburants devrait aussi augmenter.

ANALYSER

2. La consommation en énergie primaire est donnée par mètre carré et par an. Si la surface du logement double, deux fois plus d'énergie primaire (en $kWh \cdot an^{-1}$) sera consommée.

RÉALISER

3. Pour la maison du document 1 :
Énergie produite = 4 700 + 3 300 + 5 000 = 13 000 kWh
Énergie consommée = 14 000 + 5 000 = 19 000 kWh
Sur un an, le bilan énergétique est de :
Énergie produite – Énergie consommée =
13 000 – 19 000 = – 6 000 kWh.
La maison consomme davantage d'énergie qu'elle n'en produit. Ce n'est pas une construction à énergie positive.

COMMUNIQUER

4. Le texte doit être court et synthétique. Il doit utiliser les mots-clés écrits dans les documents et les questions comme « habitat », « transports », « concept

bioclimatique », « moteurs », « enjeux énergétiques et environnementaux ».
Voici un exemple de réponse.
L'habitat et les transports sont des domaines très demandeurs en énergie. Toute mesure d'économie d'énergie dans ces deux secteurs permet donc de baisser la consommation en énergie et par conséquent les impacts sur l'environnement. Par exemple, le concept bioclimatique et les nouveaux moteurs permettent de réduire la consommation d'énergie et de moins polluer. En matière d'habitat, certaines mesures de bon sens et sans surcoût – orientation convenable, gestes au quotidien – permettraient de résoudre certains problèmes liés aux enjeux énergétiques et environnementaux s'ils étaient appliqués à grande échelle.

3. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Des pistes pour une chimie durable

Commentaires
La chimie est souvent considérée comme une industrie polluante, pourtant elle tend à devenir plus propre. Pour quantifier la limitation des déchets (doc. 3), on peut utiliser l'économie d'atomes comme le précise le document 1. Par ailleurs, les piliers de « chimie verte » (doc. 2) sont appliqués de plus en plus largement au sein de l'industrie chimique.

Réponses
S'APPROPRIER
1. a. Le rendement d'une transformation chimique est compris entre 0 et 1 (ou 0 et 100 %). S'il est égal à 0, aucun produit n'aura été obtenu. S'il est égal à 1, la réaction aura été totale.
b. Les valeurs de l'économie d'atomes, puisque $m_A + m_B = m_P + m_Q$ sont telles que :

$$m_P < m_A + m_B$$

$$0 < E_{at} = \frac{m_P}{m_A + m_B} < 1$$

$$0 < E_{at} < 1$$

Si $E_{at} \approx 0$, la synthèse n'est pas économe.
Si $E_{at} \approx 1$, la synthèse est très économe.
c. Le rendement d'une transformation chimique est insuffisant pour rendre compte de l'efficacité d'un procédé industriel car il ne tient pas compte des autres produits obtenus, notamment des déchets et de la pollution occasionnés.
d.

Limiter	Favoriser
Résidus Dépenses énergétiques	Économie d'atomes Molécules plus sélectives et non toxiques Conditions douces Solvants moins polluants Procédés catalytiques Sécurité Biodégradabilité Utilisation de ressources renouvelables Analyses en temps réel

VALIDER
2. Pour la première synthèse historique :

$$E_{at} = \frac{M(\text{aspartame})}{\sum M(\text{réactifs})}$$

$$E_{at} = \frac{294}{133+165+2\times40+23{,}9+2+170{,}5+2\times108+197{,}5+2\times32+206+2\times2}$$

$$E_{at} = \frac{294}{1\,261{,}9} = 0{,}233.$$

Pour la synthèse enzymatique :

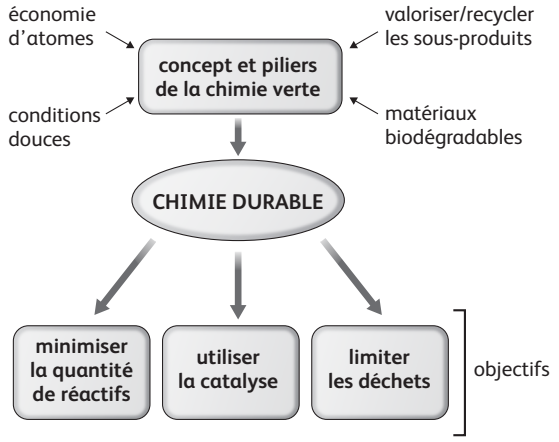
$$E_{at} = \frac{M(\text{aspartame})}{\sum M(\text{réactifs})}$$

$$E_{at} = \frac{294}{223 + 179 + 2} = 0{,}728.$$

La synthèse enzymatique est plus économe en atomes et respecte donc mieux ce critère de la chimie durable.

ANALYSER
3. a. Limiter les déchets permet d'augmenter l'économie d'atomes. Par ailleurs, cela renforce la sécurité sur site.
b. Un co-produit peut être réutilisé tandis qu'un sous-produit est un déchet inutilisable.

COMMUNIQUER
4. Le schéma doit reprendre les mots-clés de l'activité et être visuel. Par exemple :



4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Chimie verte et respect de l'environnement

Commentaires
L'industrie chimique est souvent pointée du doigt en matière d'environnement. Pourtant, de nombreux efforts sont réalisés depuis des décennies pour limiter l'impact environnemental de telles entreprises.
Le document 1 renseigne sur l'utilisation du dioxyde de carbone supercritique, un solvant d'extraction de plus en plus utilisé et qui permet de valoriser le CO_2, l'un des gaz à effet de serre. Le document 2 explique ce qu'est la chimie douce à partir de l'exemple des diatomées. Enfin, le document 3 offre une vue d'ensemble de la chimie

verte et est ainsi un complément au document 2 de l'activité précédente.

Réponses

CONNAÎTRE

1. Une extraction a pour but la séparation de diverses espèces d'un milieu réactionnel. Au lycée, le plus souvent, on veut séparer le produit d'intérêt des autres espèces du milieu. Pour cela, on réalise une extraction par solvant : une extraction liquide-liquide.

S'APPROPRIER

2. a. Dans l'extracteur (étape 1), le dioxyde de carbone est à l'état de fluide supercritique. Puis, lorsqu'il est détendu (étape 2), il devient gazeux ; le recyclage nécessite de le porter à nouveau à l'état supercritique.

b. Le consommateur-citoyen pourrait boycotter les produits qui ne sont pas fabriqués par procédés industriels issus de la chimie verte. Ainsi, les industriels seraient obligés de suivre les principes de la chimie durable.

ANALYSER

3. a. L'extraction au dioxyde de carbone est efficace et ne dénature pas le goût. Cette méthode ne laisse pas de traces résiduelles de solvants et a un bon impact sur l'environnement (utilisation d'un gaz à effet de serre) à un coût raisonnable.

b. L'extraction au dioxyde de carbone supercritique préserve l'environnement puisque le dioxyde de carbone n'est pas toxique et est même un gaz à effet de serre. Travailler à température ambiante permet de faire des économies d'énergie. Cependant, cette extraction nécessite de fortes pressions, elle n'est pas très économe en énergie.

c. Chimie verte et chimie douce visent à faire des économies d'énergie dans l'industrie chimique et à protéger l'environnement tout en offrant une palette toujours plus étendue de matériaux pour répondre aux demandes de la population.

La chimie verte est principalement basée sur des connaissances en physique et en chimie tandis que la chimie douce laisse une large place à la biologie.

COMMUNIQUER

4. Le texte doit être court et synthétique. Il doit utiliser les mots-clés écrits dans les documents comme « chimie durable », « matériaux bio-inspirés », « douze principes de la chimie verte », « perspective globale ». Il doit également s'appuyer sur l'exemple du dioxyde de carbone supercritique et citer au moins un des piliers de la chimie verte.

5. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Valorisation du dioxyde de carbone

Commentaires

Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre. Sa concentration dans l'atmosphère terrestre augmente toujours plus, au risque de bouleverser le climat. Pour limiter les effets du dioxyde de carbone sur l'effet de serre, il faut tendre vers sa valorisation car le stockage comporte des risques.

Le document 1 explique comment le dioxyde de carbone est utilisé dans le monde ; le texte est accompagné d'un diagramme indiquant les tonnages des applications du CO_2. Il est illustré par une photographie de laboratoire de recherche qui étudie les capacités des algues à consommer le dioxyde de carbone. Le document 2 décrit une des voies de valorisation du dioxyde de carbone ; le texte est résumé par un schéma. Des données utiles pour résoudre la question **2. c.** sont fournies.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. Il est intéressant de valoriser le dioxyde de carbone car c'est un gaz à effet de serre produit dans les centrales de production d'électricité, les raffineries, les cimenteries, les usines sidérurgiques.

La valorisation du CO_2 permet sa transformation, tandis que le stockage géologique n'est qu'une étape intermédiaire qui remet à une date ultérieure le problème de l'élimination du dioxyde de carbone.

b. Les disciplines concernées par les trois méthodes de valorisation du CO_2 sont la physique, la chimie et la géologie.

RÉALISER

2. a. Au cours de l'année 2015, environ 32 milliards de tonnes de dioxyde de carbone ont été produites. (Source : http://www.planetoscope.com/co2/261-emissions-mondiales-de-co2-dans-l-atmosphere.html)

En comparaison avec la masse de CO_2 valorisée en 2008 (153,5 millions de tonnes), cela représente un pourcentage de :

$$\frac{153{,}5 \times 100}{32 \times 1000} = 0{,}48\ \%.$$

b. L'équation de réaction s'écrit :

$$4\ H_2(g) + CO_2(g) \rightarrow CH_4(g) + 2\ H_2O\ (g).$$

Les gaz sont considérés comme répondant au modèle du gaz parfait ; leurs volumes sont donc proportionnels à leurs quantités. Les coefficients stœchiométriques du dihydrogène, du dioxyde de carbone et du méthane sont dans les proportions 4:1:1. On retrouve bien les mêmes proportions dans les débits volumiques – ou volumes par heure – entrant et sortant de l'unité.

c. Énergie produite par la combustion de 1,0 m^3 de méthane : 33,0 MJ.

Énergie consommée pour produire 1,0 m^3 de méthane : $4 \times 20{,}0 + 8{,}0 + 7{,}0 = 95{,}0$ MJ.

Le bilan énergétique global par m^3 de méthane est de : énergie produite – énergie consommée =

$$33{,}0 - 95{,}0 = -62{,}0\ \text{MJ}.$$

VALIDER

3. Pour répondre à certains enjeux énergétiques et environnementaux, différentes manières de valoriser le

dioxyde de carbone ont été mises en place, comme :
– sans transformation chimique, le dioxyde de carbone est utilisé pour ses propriétés physiques, comme solvant ou comme réfrigérant par exemple ;
– par réaction chimique avec une autre espèce chimique fortement réactive, le dioxyde de carbone peut mener à la synthèse d'un produit chimique de base ou d'un produit à valeur énergétique plus forte que celle du dioxyde de carbone ;
– par l'intermédiaire de la photosynthèse au sein d'organismes biologiques, telles que les algues, le dioxyde de carbone peut être utilisé pour synthétiser des produits d'intérêt.

6. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Suivi cinétique d'une hydrolyse

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

EXERCICES Appliquer le cours

13. Comparer deux synthèses
a. Première synthèse : le produit d'intérêt est C_4H_8.
$M(C_4H_8) = 4\,M(C) + 8\,M(H) = 48 + 8 = 56\ g{\cdot}mol^{-1}$
Les réactifs :
$M(C_4H_9Br) = 4\,M(C) + 9\,M(H) + M(Br)$
$= 48 + 9 + 80 = 137\ g{\cdot}mol^{-1}$
$M(C_2H_5ONa) = 2\,M(C) + M(Na) + 5\,M(H) + M(O)$
$= 24 + 23 + 5 + 16 = 68\ g{\cdot}mol^{-1}$

$$E_{at} = \frac{M(C_4H_8)}{M(C_2H_5ONa) + M(C_4HgBr)} = 0{,}27$$

Seconde synthèse : $E_{at} = \dfrac{M(C_4H_8)}{M(C_4HgBr)} = 0{,}41$.

b. La seconde synthèse est plus économe en atomes que la précédente. Cependant, elle n'est pas économe en énergie thermique. C'est pourquoi elle n'est pas intéressante du point de vue de la chimie durable.

14. Analyser un document
a. Le solvant permet la mise en contact des réactifs.
L'éthanol, l'hexane, le cyclohexane et le dichlorométhane sont des solvants utilisés au lycée.
b. Des solides ne peuvent entrer en contact sans solvant.
c. La vaporisation des solvants traditionnels est l'une des sources de pollution de l'air.

15. Interpréter la thermographie d'une maison
L'isolation de cette maison semble défaillante au niveau des fenêtres puisqu'elles apparaissent en rose sur le document : les déperditions thermiques sont importantes puisque la température de la paroi est élevée par rapport à celle des autres zones.

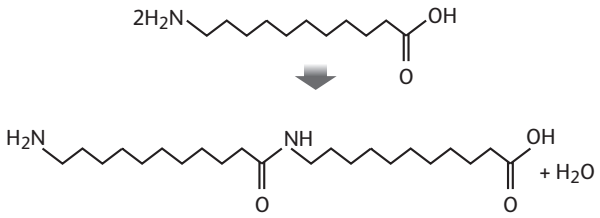
EXERCICES S'entraîner

16. Exercice résolu dans le manuel

17. Application de l'exercice résolu
1. Comme la masse de CO_2 est donnée par kilomètre parcouru, ce véhicule émettra d'autant plus de dioxyde de carbone qu'il parcourra une longue distance.
2. $n_{CO_2} = 12 \times n_{C_{12}H_{26}}$ d'après l'équation de réaction.
Donc, par kilomètre parcouru, $n_{CO_2} = 12 \times 0{,}22 = 2{,}6$ mol.
Or, $m_{CO_2} = n_{CO_2} \times M = 2{,}6 \times 44 = 1{,}1 \times 10^2$ g.

3. Ce véhicule est donc de classe B.

18. ★ Apprendre à rédiger
> COMPÉTENCES : **Analyser, s'approprier, réaliser, communiquer.**
a. Le ricin n'entre pas en compétition avec les cultures alimentaires et demande peu d'eau.
b. Pharmacie, automobile, ameublement, bâtiment.
c. Il se forme de l'eau.



19. ★ In English Please
> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser.**
a. Un train de 200 m de long a une masse de 410 tonnes au lieu de 480 tonnes, soit un gain de 70 tonnes par rapport aux trains concurrents :
$\dfrac{70}{410} = 0{,}17$ soit 17 % de gain sur la masse.
b. Le freinage électrodynamique par récupération permet d'économiser de l'énergie en restituant en priorité l'énergie sur le réseau lors des phases de ralentissement et d'arrêt.
c. L'« électricité sans carbone » est l'électricité produite sans émission de dioxyde de carbone.
d. Les atouts de l'AGV du point de vue du respect de l'environnement sont les suivants :
– pas d'émission de CO_2 ;
– 90 % des matériaux utilisés sont recyclables ;
– économie d'énergie de 15 % ;
– peu d'émission sonore.

20. Transport fluvial
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**
Le transport fluvial est l'un des modes de transport alternatif au transport routier. Il va se développer dans les prochaines années du fait du Grenelle de l'environnement. En effet, le transport fluvial est 3,7 fois plus efficace que le transport routier en équivalent pétrole consommé par tonne de marchandise transportée. Il

permet de transporter aussi bien des passagers que des marchandises, matières premières ou produits finis. Son développement doit permettre de multiplier par environ quatre le transport de marchandises par voie fluviale d'ici 2020. Ceci sera rendu possible grâce à la nouvelle liaison entre la Seine et le nord de l'Europe (canal Seine-Nord-Europe).
L'avantage majeur du transport fluvial réside dans le fait qu'un convoi fluvial équivaut à 250 camions de 20 tonnes ou à 125 wagons pour une même quantité de marchandises transportée. Certes, le transport fluvial émet deux fois plus de dioxyde de carbone et consomme environ six fois plus d'énergie par tonne de marchandises transportée et par kilomètre parcouru que le transport ferroviaire, mais il reste très compétitif par rapport au transport routier.

21. Recyclage

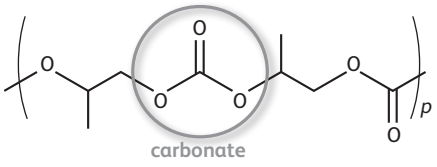
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. Le TMDS étant un sous-produit de l'industrie du silicone, son utilisation permet donc de faire du recyclage dans l'industrie chimique.
b. Le sous-produit obtenu en fin de réaction peut être valorisé (notamment pour le traitement hydrofuge des matériaux).
c. Dans le texte, il est écrit : « Le TMDS est facile à travailler avec des quantités de Si–H proches de la stœchiométrie. » Le TMDS contient deux liaisons Si–H. Il faut donc environ 0,5 mol de TMDS par mole d'amide.

22. ★ Valorisation du dioxyde de carbone

> COMPÉTENCES : **Réaliser, analyser, valider.**

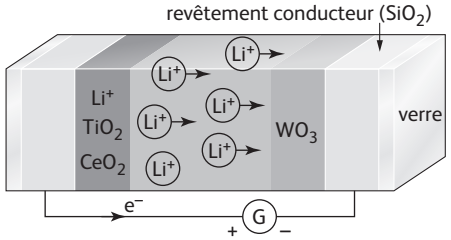
a. Dans le polymère, le carbone doublement lié à l'oxygène va bien être lié par ailleurs à deux atomes d'oxygène. Ci-dessous un exemple avec deux motifs consécutifs du polymère.



b. À température ambiante, le phosgène est un gaz volatile mais plus lourd que l'air. Son odeur de foin est relativement discrète et permet mal de détecter sa présence. En cas d'inhalation, le phosgène réagit avec l'eau contenue dans les poumons pour former de l'acide chlorhydrique qui attaque l'organisme. Selon la quantité de gaz inhalé, les conséquences peuvent aller de troubles respiratoires à l'œdème pulmonaire et à la mort.
c. Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre dont il faut se débarrasser, tandis que les polycarbonates possèdent de nombreuses applications dont voici certains exemples sur le site Internet de la société Novomer :
http://www.novomercom/?action=CO2_commercialization
d. Cette synthèse fait en effet partie du panel de valorisation du dioxyde de carbone puisque ce dernier réagit avec une espèce fortement réactive (l'époxyde) pour donner un produit utilisable dans l'industrie des polymères.

23. ★★ S'auto-évaluer

a. La réaction de formation du « bronze de tungstène » est une réduction car c'est un gain d'électrons.
b.



c. Les électrons circulent alors dans l'autre sens.
La demi-équation s'écrit : $Li_xWO_3 = WO_3 + x\,Li^+ + x\,e^-$
Le « bronze de tungstène » est donc consommé et la couleur initiale réapparaît.
d. Ces vitrages permettent d'économiser sur la climatisation sans rien perdre au niveau de l'éclairage et du chauffage. Par conséquent, ils permettent de faire des économies d'énergie.

24 Critères de la chimie durable

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Les documents 2, 3 et 4 permettent d'illustrer principalement les points 1 (éviter les rejets plutôt que d'avoir à les traiter), 2 (économie d'atomes), 5 (limiter les auxiliaires de synthèse) et 9 (rechercher les solutions catalytiques) du premier document.
Selon le deuxième document, l'utilisation des agroressources a fait considérablement augmenter la production d'un sous-produit, le glycérol. Des chimistes ont alors développé des synthèses de molécules tensioactives (de type étheroxyde) à partir de ce glycérol. Historiquement, la synthèse d'étheroxydes se faisait par la synthèse de Williamson, générant des quantités stœchiométriques de sels. La méthode développée par les auteurs de l'article est une synthèse catalysée, transposable dans l'industrie, lors de laquelle presque tous les atomes des réactifs sont utilisés, et ne formant que de l'eau comme sous-produit. D'autre part, le glycérol étant à la fois le réactif et le solvant de la réaction, cette méthode limite les auxiliaires de synthèse.
Le deuxième document présente une réaction dont l'économie d'atomes est optimisée puisqu'elle ne génère aucun sous-produit : la synthèse des esters symétriques de Tishchenko se fait par dimérisation des aldéhydes. Cette réaction se fait grâce à l'utilisation de catalyseurs adaptés à base de ruthénium.
Enfin, le quatrième document montre comment le chimiste contribue à la dépollution de la nature au travers de deux exemples : la dépollution des gaz d'échappement dans les pots catalytiques et le traitement des eaux usées par une méthode photochimique.
On constate que l'ensemble des méthodes décrites utilisent des catalyseurs. Il semble donc qu'un des enjeux majeurs de la chimie moderne soit de développer des catalyseurs toujours plus efficaces et plus spécifiques.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

25. LES FOURMIS DÉTIENNENT-ELLES LA CLÉ DU CARBURANT DU FUTUR ?

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

1. L'acide formique est liquide à température ambiante, contrairement au dihydrogène qui est un gaz et qui doit être compressé pour être plus facilement transporté. De plus, l'acide formique est très peu inflammable, contrairement au dihydrogène qui explose en présence de dioxygène, d'une flamme ou d'une étincelle. Enfin, l'acide formique permet de stocker le double d'énergie à volume égal par comparaison avec le dihydrogène.

2. a. Un catalyseur permet de diminuer la durée d'une transformation chimique. Une transformation est « totale » si son avancement maximal est égal à son avancement final. Il n'est donc pas possible de mettre en parallèle cinétique et avancement.

b. L'énergie chimique stockée dans la liaison entre atomes d'hydrogène est convertie en énergie électrique.

3. L'équation de réaction est : $HCO_2H \rightarrow CO_2 + H_2$

En considérant la transformation comme totale :

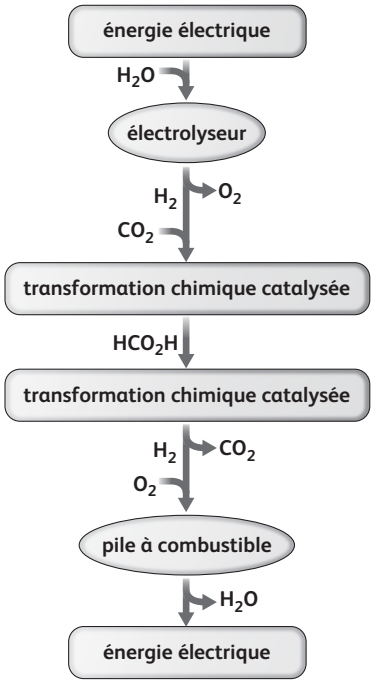
$n_{H_2} = n_{HCO_2H}$

Or, $n = \dfrac{m}{M}$ donc :

$m_{H_2} = m_{HCO_2H} \times \dfrac{M_{H_2}}{M_{HCO_2H}}$ avec $m_{HCO_2H} = d_{AH} \times V$

A. N. : $m_{H_2} = \dfrac{1{,}22 \times 1{,}0 \times 2{,}0}{46} = 0{,}053$ kg soit 53 g.

4.



26. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Synthèse de l'ibuprofène

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

Procédé de Boots :

$$UA = \frac{M(C_{13}H_{18}O_2)}{M(C_{10}H_{14}) + M(C_2H_5ONa) + M(C_4H_7ClO_2) + M(HCl) + M(NH_2OH) + 2M(H_2O)}$$

$$= \frac{206}{134 + 68 + 122{,}5 + 36{,}5 + 33 + 36} = 0{,}48$$

Procédé BHC : $UA = 0{,}77$.

Par ailleurs, le procédé BHC permet de valoriser le monoxyde de carbone, un gaz toxique produit lors d'une combustion partielle. Il utilise également du dihydrogène relativement aisé à obtenir. Il ne fait apparaître qu'un sous-produit organique qui peut jouer le rôle de réactif dans un autre procédé.

Pour toutes ces raisons, le procédé BHC semble mieux répondre aux objectifs de la chimie verte.

CHAPITRE 21

AGIR

Contrôle de la qualité : dosages

> Manuel pages 472 à 497

Choix pédagogiques

Ce chapitre a pour objectifs d'aborder :
– la conductimétrie ;
– le dosage par étalonnage ;
– le dosage par titrage.
Les activités de ce chapitre permettent de découvrir la conductimétrie, et d'effectuer divers dosages s'inscrivant dans le cadre du contrôle de qualité.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Dans les laboratoires de la société Eckes Granini®, des prélèvements de jus de fruits sont régulièrement effectués.

À quoi sont destinés ces échantillons de produits ?

La photographie de la page d'ouverture présente une technicienne de laboratoire en train de faire un prélèvement de jus de fruits. Les élèves peuvent alors se demander ce qui est analysé dans un tel laboratoire.
On peut ainsi introduire la notion de contrôle de qualité.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Contrôle de qualité du lait

Commentaires

Cette activité explique l'importance du contrôle de qualité, en particulier dans le domaine de l'alimentaire et permet d'introduire la notion de conductivité. Les élèves peuvent commencer à faire le lien entre les pratiques chimiques vues au lycée, et leurs applications dans le domaine de l'industrie.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. Le contrôle du lait commence dès la traite. Il est ensuite analysé à son arrivée à la laiterie, puis tout au long de sa transformation (fromage, yaourt, beurre, crème, etc.).
b. Le premier contrôle de qualité effectué est une mesure de la conductivité.

ANALYSER

2. a. Les critères de qualité ne sont pas uniquement « chimiques », comme en atteste le document 2.

Critères chimiques	Critères physiques	Critères biologiques
– le pH	– la densité – la température d'ébullition – la température de fusion	– les germes totaux – les cellules somatiques

b. Le lait analysé dans le document 2 n'est pas consommable car le nombre de germes totaux dépasse 100 000 par mL de lait.

COMMUNIQUER

3. Lors du contrôle de la qualité du lait, divers critères sont analysés. Ces critères sont définis par des normes quantitatives. Pour déterminer des quantités de matières d'espèces chimiques dans le lait, on fait appel à des chimistes. Lorsque l'on a besoin de déterminer des concentrations de bactéries ou de germes dans le lait, on fait alors appel à un biologiste.
Le scientifique est donc indispensable lors du contrôle de qualité.

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Mesures de conductivité

Commentaires

Au cours de cette activité, les élèves doivent dans un premier temps réaliser des dilutions.
À l'issue des dilutions, les mesures des conductivités des solutions filles doivent amener les élèves à proposer :
– une relation de proportionnalité entre la conductivité et la concentration ;
– une méthode de dosage à partir de mesures de conductivité (dosage par étalonnage).

• **Liste du matériel :**
– une cellule de conductimétrie reliée à un conductimètre ;
– au moins trois béchers de prélèvement ;
– quatre fioles jaugées de 50,0 mL ;
– une pipette jaugée de 25,0 mL ;
– une pipette jaugée de 20,0 mL ;
– une pipette jaugée de 10,0 mL ;
– une pipette jaugée de 5,0 mL.
• **Liste des solutions :**
– eau ;
– solution de chlorure de sodium à 1,0 x 10^{-3} mol·L^{-1}.

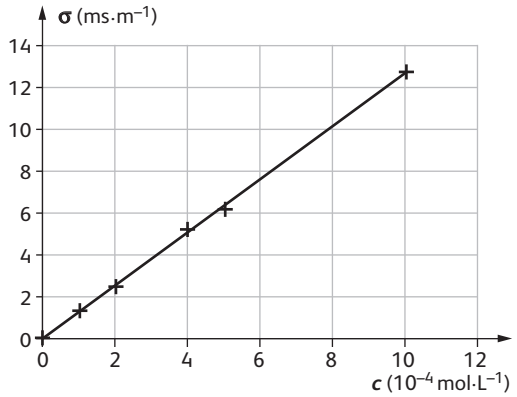
Réponses

RÉALISER

1. a. b. et **c.**

Solution S_i	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4
Volume V_i de solution mère à prélever (mL)	–	25,0	20,0	10,0	5,0
Volume de la fiole jaugée utilisée (mL)	–	50	50	50	50
Concentration c_i (10^{-4} mol·L^{-1})	10	5,0	4,0	2,0	1,0
Conductivité σ_i (mS·m^{-1})	12,8	6,3	5,1	2,5	1,3

d.



VALIDER

2. a. La courbe obtenue est une droite passant par l'origine du repère. La conductivité σ et la concentration d'une solution ionique sont proportionnelles.

b. Cette relation de proportionnalité s'apparente à la loi de Beer-Lambert (relation de proportionnalité entre l'absorbance et la concentration).

COMMUNIQUER

3. On mesure la conductivité σ de diverses solutions, de concentrations différentes, d'une même espèce ionique. Sur un graphique, on place les points de coordonnées (c_i ; σ_i) et on trace la droite passant au plus près des points. On mesure ensuite la conductivité σ′ de la solution S' de concentration inconnue (mais contenant la même espèce ionique). On reporte cette valeur de conductivité sur le graphique, et par une simple lecture, on détermine la concentration de la solution S'.

3. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Réaliser un dosage conductimétrique

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

4. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Contrôle qualité par titrage conductimétrique

Commentaires

Cette activité permet aux élèves d'utiliser à nouveau le conductimètre.
D'autre part, elle leur permet de réaliser un premier titrage et d'effectuer parallèlement un contrôle de qualité.

• **Liste du matériel :**
– une cellule de conductimétrie reliée à un conductimètre ;
– un porte électrode ;
– une éprouvette graduée de 250 mL ;
– un bécher de 300 mL ;
– un agitateur magnétique et son barreau aimanté ;
– une burette graduée de 25 mL ;
– un statif ;
– au moins deux béchers de prélèvement.
• **Liste des solutions :**
– eau du robinet ;
– solution de nitrate d'argent à 10 mmol·L^{-1}.

ANALYSER

1. a. Le réactif titré est l'ion chlorure Cl^-. Le réactif titrant est l'ion argent Ag^+.

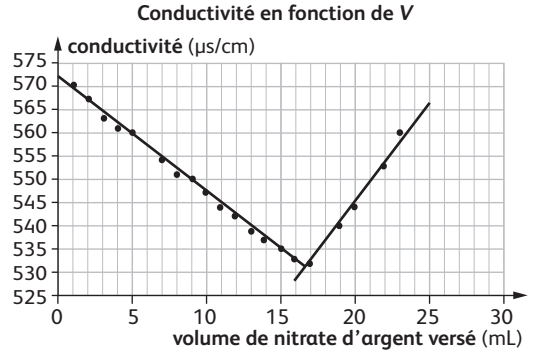
b. L'équation de la réaction support du titrage est :

$$Cl^-(aq) + Ag^+(aq) \rightarrow AgCl(s).$$

c. Ce titrage peut être suivi par conductimétrie car le milieu réactionnel contient des ions, dont les concentrations évoluent au cours du titrage. Il y a donc évolution de la conductivité σ au cours du titrage.

RÉALISER

2. a. b. et **c.**



ANALYSER

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

b. $\frac{n_{Cl^-,i}}{1} = \frac{n_{Ag^+,e}}{1}$ soit $c' \times V_{eau} = c \times V_e$

$c' = \dfrac{c \times V_e}{V_{eau}}$

A. N. : $c' = \dfrac{10 \times 10^{-3} \times 17}{200} = 8{,}5 \times 10^{-4}$ mol·L^{-1}

c. On a :

$c'_m = c' \times M$

$c'_m = 8{,}5 \times 10^{-4} \times 35{,}5 = 3{,}0 \times 10^{-2}$ g·L^{-1} = 30 mg·L^{-1}

$c'_m < 250$ mg·L^{-1} : l'eau du robinet est conforme à la législation.

5. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Réaliser un titrage pH-métrique et colorimétrique

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

EXERCICES Appliquer le cours

Dosage par étalonnage (§1 et 2 du cours)

14. Exploiter des données numériques

Les conductivités σ_1 et σ_2 des deux solutions ioniques sont données par les relations :

$\sigma_1 = \lambda_{Fe^{2+}} [Fe^{2+}] + \lambda_{SO_4^{2-}} [SO_4^{2-}]$ et

$\sigma_2 = \lambda_{Pb^{2+}} [Pb^{2+}] + \lambda_{SO_4^{2-}} [SO_4^{2-}]$.

Or : $[Fe^{2+}] = [SO_4^{2-}] = [Pb^{2+}] = [SO_4^{2-}] = c$.

D'où : $\sigma_1 = (\lambda_{Fe^{2+}} + \lambda_{SO_4^{2-}}) \times c$ et $\sigma_2 = (\lambda_{Pb^{2+}} + \lambda_{SO_4^{2-}}) \times c$.

La conductivité σ_2 étant plus grande que la conductivité σ_1, la conductivité ionique molaire de l'ion plomb Pb^{2+} $\lambda_{Pb^{2+}}$ est donc supérieure à celle de l'ion fer II Fe^{2+}.

L'ion plomb Pb^{2+} conduit plus facilement le courant électrique que l'ion fer II Fe^{2+}.

15. Exploiter une courbe d'étalonnage

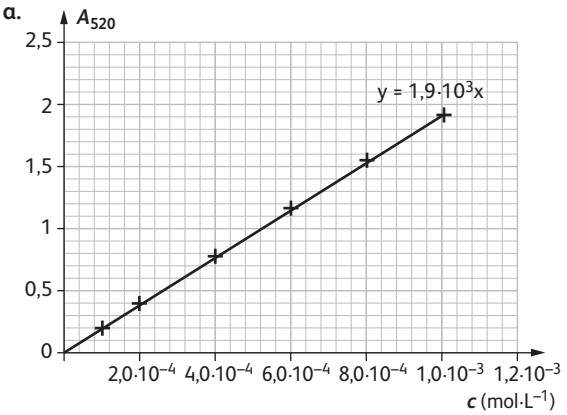
a. Par lecture graphique, on trouve : $c = 3{,}7$ mmol·L^{-1}.

b. Par lecture graphique, on trouve : $\sigma' = 79$ mS·m^{-1}.

Dosage par titrage (§3 du cours)

16. Réaliser un graphique

a.



b. L'équation de la droite obtenue est :

$A_{520} = 1{,}9 \times 10^3 \times c$.

c. D'après la loi de Beer-Lambert : $c_0 = \dfrac{A_{520,0}}{\varepsilon_\lambda \ell}$.

D'où : $c_0 = \dfrac{1{,}080}{1{,}9 \times 10^3} = 5{,}7 \times 10^{-4}$ mol·L^{-1}.

17. Écrire l'équation de réaction

$5 \times (Fe^{3+}(aq) + e^- = Fe^{2+}(aq))$

$MnO_4^-(aq) + 8\,H^+(aq) + 5\,e^- = Mn^{2+}(aq) + 4\,H_2O(\ell)$

$MnO_4^-(aq) + 5\,Fe^{2+}(aq) + 8\,H^+(aq) \rightarrow Mn^{2+}(aq) + 5\,Fe^{3+}(aq) + 4\,H_2O(\ell)$

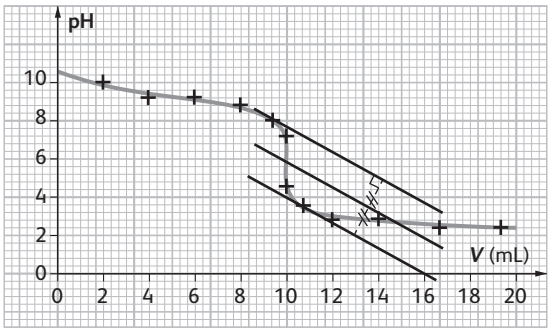
18. Interpréter un changement de pente

Avant l'équivalence, le réactif limitant est HO^-. Les ions H_3O^+ sont consommés, des ions Na^+ sont introduits et la quantité d'ions NO_3^- n'évolue pas. La conductivité diminue car la conductivité ionique molaire de H_3O^+ est beaucoup plus grande que celle de Na^+.

Après l'équivalence, le réactif limitant est H_3O^+. La quantité d'ions NO_3^- n'évolue pas. Des ions HO^- et Na^+ sont introduits sans être consommés, donc la conductivité augmente.

19. Déterminer une concentration

a. On trace deux tangentes à la courbe, parallèles et placées de part et d'autre du saut de pH où la courbe a une grande courbure. On trace ensuite la droite parallèle et équidistante à ces deux tangentes. Cette droite coupe la courbe de titrage au point d'abscisse $V_e = 10{,}0$ mL.



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

Donc : $\dfrac{n_{NH_3,i}}{1} = \dfrac{n_{N_3O^+,e}}{1}$

$c_S V_S = c V_e$ soit $c_S = \dfrac{c V_e}{V_S}$

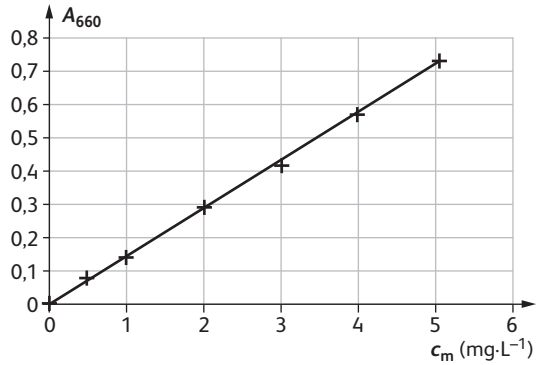
A. N. : $c_S = \dfrac{10 \times 10^{-3} \times 10{,}0}{10{,}0} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

EXERCICES S'entraîner

20. Exercice résolu dans le manuel

21. Application de l'exercice résolu

1.



2. Par lecture graphique : $c_{m,S} = 4{,}0$ mg·L^{-1}.

3. Le collyre a été dilué 50 fois, d'où :
$c_m = 50 \times c_{m,S} = 50 \times 4{,}0 = 2{,}0 \times 10^2$ mg·L^{-1}.

4. $m_B = c_m \times V = 2{,}0 \times 10^2 \times 0{,}100 = 20$ mg.
Cette valeur correspond bien à celle indiquée sur l'étiquette du flacon.

22. Exercice résolu dans le manuel

23. Application de l'exercice résolu

1. Le changement de pente s'effectue à $V_e = 10{,}0$ mL.

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

$$\frac{n_{NH_3,i}}{1} = \frac{n_{NH_3O^+,e}}{1}$$

$$c_S V_S = cV_e \quad \text{soit} \quad c_S = \frac{cV_e}{V_S}$$

A. N. : $c_S = \dfrac{20 \times 10^{-3} \times 10{,}0}{200} = 1{,}0 \times 10^{-3}$ mol·L^{-1}.

24. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. Puisque l'on utilise de l'empois d'amidon, on repère l'équivalence par un indicateur de fin de réaction.

b. Le réactif titrant est le diiode I_2. Le réactif titré est le dioxyde de soufre.

$SO_2\,(aq) + I_2\,(aq) + 2H_2O(\ell) \rightarrow$
$SO_4^{2-}\,(aq) + 2\,I^-\,(aq) + 4\,H^+\,(aq)$.

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

$$\frac{n_{SO_2,i}}{1} = \frac{n_{I_2,e}}{1}.$$

d. $c_S V_S = cV_e$ soit $c_S = \dfrac{cV_e}{V_S}$

A. N. : $c_S = \dfrac{50 \times 10^{-3} \times 8 \times 10^{-3}}{10{,}0 \times 10^{-3}}$

$= 4{,}0 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1} $= 40$ mmol·L^{-1}.

25. ★ Conservateur alimentaire

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. $C_6H_5CO_2H\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow C_6H_5CO_2^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$.

b. $V_e = 15{,}0$ mL.

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

$$\frac{n_i}{1} = \frac{n_e}{1}$$

d. $c_S V_S = cV_e$ soit $c_S = \dfrac{cV_e}{V_S}$.

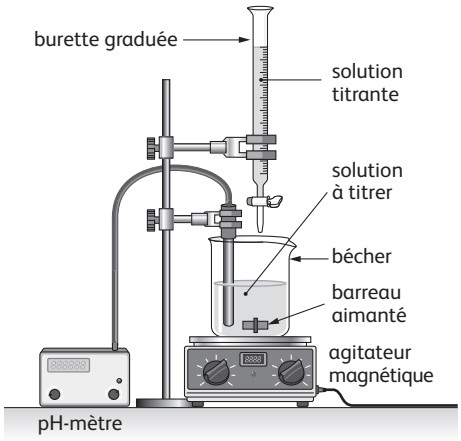
A. N. : $c_S = \dfrac{50 \times 10^{-3} \times 15{,}0 \times 10^{-3}}{20{,}0 \times 10^{-3}}$

$= 3{,}8 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

26. ★ Titrage d'une solution d'éthylamine

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, réaliser.**

a.



b. $C_6H_5NH_2\,(aq) + H_3O^+\,(aq) \rightarrow C_6H_5NH_3^+\,(aq) + H_2O\,(\ell)$.

c. $V_e = 8{,}0$ mL.

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

$$\frac{n_i}{1} = \frac{n_e}{1}$$

e. $c_S V_S = cV_e$ soit $c_S = \dfrac{cV_e}{V_S}$.

A. N. : $c_S = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-1} \times 8{,}0 \times 10^{-3}}{20{,}0 \times 10^{-3}}$

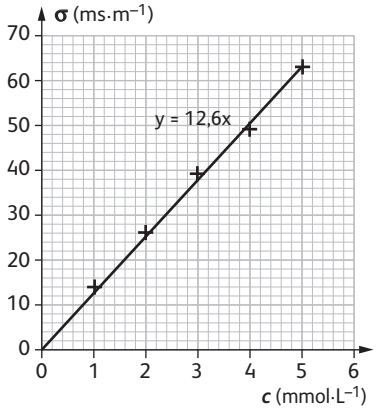
$= 4{,}0 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

f. Le jaune d'alizarine ne convient pas car sa zone de virage n'est pas comprise dans la zone de forte variation de pH. Même raison pour la phénolphtaléine. Il faut donc choisir le rouge de chlorophénol.

27. ★ In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, valider.**

a.



b. L'équation de la droite obtenue est :
$\sigma = 12{,}6 \times c$ (σ en mS·m^{-1} et c en mmol·L^{-1}).

c. Par lecture graphique, on trouve : $c_F = 3{,}5$ mmol·L^{-1}.
La concentration c_F de la solution F est également donnée par la relation :

$$c_F = \frac{\sigma}{12{,}6} = \frac{44}{12{,}6} = 3{,}5 \text{ mmol·L}^{-1}.$$

Les résultats obtenus par lecture graphique et par le calcul sont identiques.

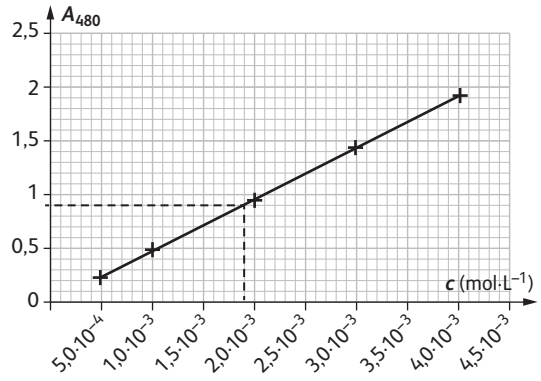
28. ★ Solution de Lugol®

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. a. Au cours d'une dilution, il y a conservation de la quantité de matière : $c_0 \times V_i = c_i \times V$.

b. Voir le tableau en bas de page.

c.



2. a. Par lecture graphique, on trouve :

$$c = 1{,}95 \times 10^{-3} \text{ mol·L}^{-1}.$$

La solution de Lugol® a été diluée 20 fois ;
d'où : $c_L = 20 \times c = 20 \times 1{,}95 \times 10^{-3} = 3{,}90 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

b. $n_L = c_L \times V = 3{,}90 \times 10^{-2} \times 0{,}100 = 3{,}90 \times 10^{-3}$ mol.
$m_L = n_L \times M\,(I_2) = 3{,}90 \times 10^{-3} \times (2 \times 126{,}9) = 0{,}990$ g.

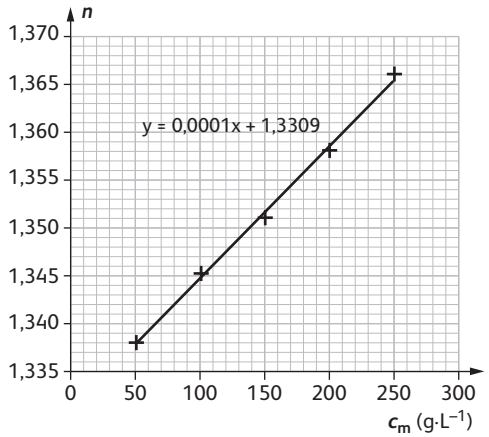
c. Écart relatif : $\dfrac{|1 - 0{,}99|}{1} \times 100 = 1$ %.

La valeur de m_L trouvée correspond à celle écrite dans la composition de la solution de Lugol®.

29. ★ Quantité de sucre dans le raisin

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a.



b. L'équation de la droite passant au plus près des points est : $n = 0{,}0001 \times c_m + 1{,}3309$.

c. La concentration massique en sucre d'un jus de raisin est donnée par la relation :

$$c_m = \frac{n - 1{,}3309}{0{,}0001}$$

Jus de raisin A : $c_{m,A} = \dfrac{1{,}347 - 1{,}3309}{0{,}0001} = 161$ g·L^{-1}.

Jus de raisin B : $c_{m,B} = \dfrac{1{,}360 - 1{,}3309}{0{,}0001} = 291$ g·L^{-1}.

Le raisin A n'est pas mûr alors que le raisin B est arrivé à maturité.

d. Le raisin vendangé est le raisin B. Pour déterminer le degré d'alcool du vin obtenu, on effectue le calcul suivant :

$$\frac{291 \times 1}{16{,}83} = 17{,}3°.$$

Tableau de l'exercice 28 question 1. b. :

Solution S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Volume V_i (mL)	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0
Concentration c_i (mol·L^{-1})	$5{,}0 \times 10^{-4}$	$1{,}0 \times 10^{-3}$	$2{,}0 \times 10^{-3}$	$3{,}0 \times 10^{-3}$	$4{,}0 \times 10^{-3}$
Absorbance $A_{480,\,i}$	0,23	0,49	0,96	1,45	1,92

30. ★ **Incertitude de la mesure**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser, communiquer.**

a. $\overline{V_e} = 12{,}03$ mL

$s_{exp} = 0{,}0886$

$s = \dfrac{0{,}0886}{\sqrt{8}} = 0{,}0313$

b. $k_s = 2 \times 0{,}0313 = 0{,}062$;

$\Delta V_e = 0{,}06$ mL ;

$V_e = (12{,}03 \pm 0{,}06)$ mL.

31. ★ **Vérification de la valeur d'une concentration**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Solution mère : c_0 ; V_0.

Solution fille : $c_1 = \dfrac{c_0}{100}$; $V = 1{,}0$ L.

Lors d'une dilution, il y a conservation de la quantité de matière : $c_0 V_0 = c_1 V$.

Donc : $V_0 = \dfrac{V}{100} = \dfrac{1{,}0}{100} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ L $= 10$ mL.

• *Liste du matériel :*

– pipette jaugée de 10 mL ;

– fiole jaugée de 1,0 L avec bouchon ;

– pissette d'eau distillée.

• *Solution* : la solution S_0.

• *Étapes :*

– Prélever un échantillon de volume $V_0 = 10$ mL de la solution S_0 à l'aide d'une pipette jaugée de 10,0 mL.

– L'introduire dans une fiole jaugée de 1,0 L.

– Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

– Boucher et agiter.

b. L'expérimentateur fait cette correction car la burette graduée lui permet de donner le résultat avec cette précision et avec cette source d'erreur.

c. L'expérimentateur titre une solution d'hydroxyde de sodium par de l'acide chlorhydrique.

Avant l'équivalence, H_3O^+ est le réactif limitant et après, HO^- est le réactif limitant.

Avant l'équivalence, la solution est bleue puis après elle est jaune.

d. Si le volume à l'équivalence a été repéré à la goutte près, la solution doit redevenir bleue lorsque l'expérimentateur ajoute une goutte de solution S_1.

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

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

$$\frac{n_{HO^-}}{1} = \frac{n_{H_3O^+,e}}{1}.$$

$$c_1 V_1 = c V_e \quad \text{soit} \quad c_1 = \frac{c V_e}{V_1}$$

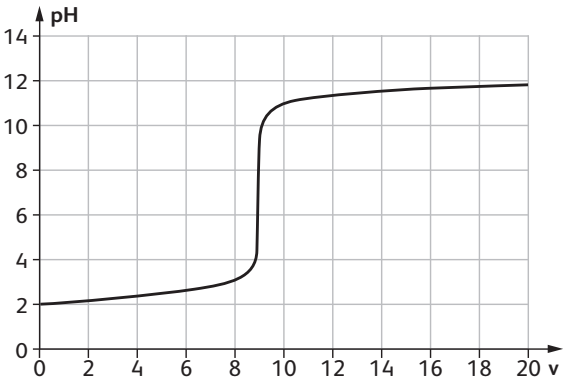
A. N. : $c_1 = \dfrac{0{,}10 \times 6{,}0 \times 10^{-3}}{10{,}0 \times 10^{-3}} = 6{,}0 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

g. $c_0 = 100\ c_1 = 6{,}0$ mol·L^{-1}. L'indication portée sur l'étiquette est correcte.

32. ★ **Choix d'un indicateur coloré**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a.



b. Il faut choisir le BBT.

33. ★ **Réaction de précipitation**

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

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

$$\frac{n_i}{1} = \frac{n_e}{1}.$$

b. Le point d'intersection des deux segments de droite de la courbe correspond à l'équivalence :

$$V_e = 11{,}4 \text{ mL}.$$

c. $c_S V_S = c V_e$ soit $c_S = \dfrac{c V_e}{V_S}$

A. N. : $c_S = \dfrac{32 \times 10^{-3} \times 11{,}4 \times 10^{-3}}{20{,}0 \times 10^{-3}} = 1{,}8 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

On a : $c_m = c_S \times M = 1{,}8 \times 10^{-2} \times 35{,}5 = 0{,}65$ g·L^{-1}.

d. L'indication portée sur l'étiquette est correcte.

34. ★★ **S'autoévaluer**

Le réactif titrant est l'ion permanganate MnO_4^-.

Le réactif titré est le peroxyde d'hydrogène H_2O_2.

Avant d'écrire l'équation de la réaction support de titrage, il faut établir les demi-équations rédox des couples mis en jeu.

$MnO_4^-(aq) + 8\,H^+(aq) + 5\,e^- = Mn^{2+}(aq) + 4\,H_2O(\ell)$ **(1)**

$O_2(g) + 2\,H^+(aq) + 2\,e^- = H_2O_2(aq)$ **(2)**

L'équation de réaction ne doit pas faire apparaître d'électrons.

On multiplie la demi-équation **(1)** par 2, et la demi-équation **(2)** par 5.

L'équation de la réaction support de titrage est :

$2\,MnO_4^-(aq) + 6\,H^+(aq) + 5\,H_2O_2(aq) \rightarrow$

$2\,Mn^{2+}(aq) + 5\,O_2(g) + 8\,H_2O(\ell)$.

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

$$\frac{n_{H_2O_2,i}}{5} = \frac{n_{MnO_4^-}}{2}.$$

$$\frac{c'V'}{5} = \frac{cV_e}{2}$$

$$c' = \frac{5}{2} \times \frac{cV_e}{V'}$$

$$c' = \frac{5}{2} \times \frac{0{,}025 \times 14{,}8}{10{,}0}$$

$$c' = 9{,}3 \times 10^{-2} \text{ mol·L}^{-1}$$

c' est la concentration de la solution fille, obtenue par dilution (d'un facteur 10) de la solution commerciale.
Donc : $c_0 = 10 \times c' = 9{,}3 \times 10^{-1}$ mol·L^{-1}.

35. Conductimétrie et aquariophilie

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

En aquariophilie, la survie d'une espèce (comme le *Paracheirodon innesi*) exige que l'eau dans laquelle elle évolue respecte des critères bien définis : température, pH, dureté, etc.

La dureté d'une eau correspond à la quantité de sels de calcium et de magnésium dissous dans cette eau. La dureté peut être exprimée en degrés français (°TH) ou degrés allemand (°gH ou °dH). Dans le cas du Paracheirodon innesi, la dureté de l'eau doit être comprise entre 3°dH et 10°dH, ce qui correspond à une eau douce.

Pour connaître la dureté d'une eau, il faut donc déterminer la quantité de sels de calcium et de magnésium dissous, ce qui revient à déterminer la quantité d'ions calcium et magnésium présents dans cette eau.

La présence d'ions dans l'eau lui assure un caractère de conducteur électrique. Une mesure de conductivité permet ainsi de déterminer la quantité d'ions présents dans une eau, et donc de savoir si cette eau est douce ou dure. Plus la conductivité électrique d'une eau est élevée, plus sa concentration en ions est grande, et plus elle est dure.

Les appareils utilisés en aquariophilie peuvent mesurer la conductivité de l'eau de l'aquarium. En atteste la notice jointe, dans laquelle apparaît l'indication « µS /cm », qui correspond à l'unité de la conductivité. Ainsi, une simple mesure de conductivité de l'eau d'un aquarium permet de savoir très rapidement si cette eau constitue un milieu propice aux poissons qui y vivent.

36. ★★ Dioxyde de soufre

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. $(MnO_4^-\,(aq) + 8\,H^+(aq) + 5\,e^- = Mn^{2+}(aq) + 4\,H_2O\,(\ell)) \times 2$
$(SO_4^{2-}(aq) + 4\,H^+(aq) + 2\,e^- = SO_2\,(aq) + 2\,H_2O\,(\ell)) \times 5$

$2\,MnO_4^-\,(aq) + 5\,SO_2\,(aq) + 2\,H_2O\,(\ell) \rightarrow$
$2\,Mn^{2+}(aq) + 5\,SO_4^{2-}(aq) + 4\,H^+(aq)$

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

c. $\frac{n_1}{5} = \frac{n_e}{2}$

d. $\frac{c_1V_1}{5} = \frac{cV_e}{2}$ soit $c_1 = \frac{5}{2}\frac{cV_e}{V_1}$

A. N. : $c_1 = \frac{5}{2} \times \frac{1{,}0 \times 10^{-2} \times 8{,}0}{10{,}0} = 2{,}0 \times 10^{-2}$ mol·L^{-1}.

e. $m_1 = n_1 \times M = c_1 \times V_0 \times M = 2{,}0 \times 10^{-2} \times 1{,}00 \times 64 = 1{,}3$ g présent dans $1{,}00 \times 10^4$ m^3 d'air.

f. $m_2 = \frac{m_1}{10^4} = 1{,}3 \times 10^{-4}$ g présent dans 1 m^3 d'air.

g. $m_2 = 1{,}3 \times 10^2$ µg $<$ 500 µg donc le seuil d'alerte n'est pas dépassé.

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : sirius.nathan.fr/sirius2017

37. L'eau de Dakin

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. a. L'équation de la réaction support de titrage s'obtient en combinant les deux demi-équations rédox.

$MnO_4^-\,(aq) + 5\,Fe^{2+}(aq) + 8\,H^+(aq) \rightarrow$
$Mn^{2+}(aq) + 5\,Fe^{3+}(aq) + 4\,H_2O\,(\ell)$

b. Avant l'équivalence, l'ion MnO_4^- est le réactif limitant et après, l'ion Fe^{2+} est le réactif limitant.

Avant l'équivalence, la solution est verte pâle puis après elle est violette.

c. En milieu acide, les ions permanganate MnO_4^- et les ions manganèse Mn^{2+} réagissent entre eux pour former un précipité brun. Si le permanganate de potassium est dans l'erlenmeyer, alors un précipité brun va se former dès que l'on va verser la solution de sulfate de fer. En effet, les ions Mn^{2+} obtenus vont réagir avec les ions MnO_4^- encore présents dans l'échantillon titré.

La quantité d'ions MnO_4^- titrée est ainsi faussée et l'équivalence est difficilement repérable.

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

$$\frac{n_i}{5} = \frac{n_D}{1}$$

b. $\frac{c'V'}{5} = \frac{cV_e}{1}$ soit $c = \frac{1}{5}\frac{c'V'}{V_e}$

A. N. : $c = \frac{1}{5} \times \frac{1{,}0 \times 10^{-3} \times 5{,}0}{15{,}9} = 6{,}3 \times 10^{-5}$ mol·L^{-1}.

c. Soit n_1 la quantité de permanganate de potassium présent dans 100 mL d'eau de Dakin.

$n_1 = c \times V = 6{,}3 \times 10^{-5} \times 0{,}100 = 6{,}3 \times 10^{-6}$ mol.

$m_1 = n_1 \times M(KMnO_4) = 6{,}3 \times 10^{-6} \times (39{,}1 + 54{,}9 + 4 \times 16{,}0)$
$= 9{,}9 \times 10^{-4}$ g.

3. Écart relatif : $\frac{|0{,}0010 - 0{,}00099|}{0{,}0010} \times 100 = 1$ %

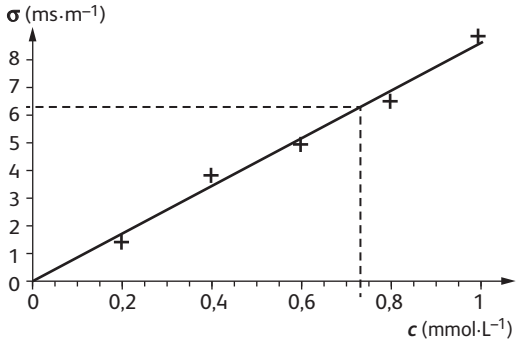
La valeur de m_1 trouvée correspond à celle écrite dans la composition de l'eau de Dakin.

38. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Les Sucrettes® : à consommer sans fin ?

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

On exploite les données du document 4 en traçant une droite d'étalonnage.



Par lecture graphique, on détermine la concentration en saccharine sodique dans la solution de Sucrette®. On obtient :

$$c_S = 7{,}3 \times 10^{-4} \text{ mol·L}^{-1}.$$

La concentration massique en saccharine sodique dans la solution est :

$$c_m = c_S \times M = 7{,}3 \times 10^{-4} \times 205{,}19 = 0{,}15 \text{ g·L}^{-1}.$$

Cette solution est obtenue en dissolvant trois comprimés de Sucrette® dans 500 mL d'eau.

La masse de saccharine sodique dans un comprimé de Sucrette® est :

$$m_{comp.} = c_m \times \frac{V}{3} = 0{,}15 \times \frac{0{,}500}{3} = 0{,}025 \text{ g} = 25 \text{ mg}.$$

Une personne diabétique de 65 kg ne doit pas dépasser $65 \times 5 = 325$ mg de saccharine sodique par jour.

Cette masse de saccharine sodique est atteinte avec 13 comprimés (325/25) de Sucrette®.

Il est peu probable qu'une personne consomme autant de comprimés par jour.

39. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Dosage d'un colorant dans un sirop

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

40. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Titrage de l'acide citrique dans un citron

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

CHAPITRE 22

AGIR

Stratégie de la synthèse organique

> Manuel pages 498 à 519

Choix pédagogiques

Ce chapitre s'inscrit dans le thème « Défis du XXIe siècle ». Il est basé sur de l'analyse critique de protocoles expérimentaux. La structure proposée n'est pas habituelle : il est composé d'activités et de bilans qui aident à acquérir les bons réflexes pour analyser des protocoles expérimentaux. Chaque aspect de l'analyse de protocole est abordé sur un exemple. Il n'y a donc pas de cours mais des bilans en fin d'activités documentaires.
Les activités 1 à 4 portent sur l'analyse de deux protocoles expérimentaux différents qui permettent de traiter les deux cas rencontrés au laboratoire : l'obtention d'un produit qui a précipité et l'obtention d'un produit qui est en solution dans le solvant considéré.
L'activité 1 « Analyse de protocoles » doit nécessairement être réalisée avant d'aborder au choix les activités 2 à 4 « Étape de transformation », « Étape de traitement », « Étapes d'identification et de purification ».
L'objectif de l'activité 5 est de comparer deux protocoles permettant de synthétiser une même espèce chimique, comme demandé dans le programme.

OUVERTURE DE CHAPITRE

Le savon de Marseille

Pourquoi est-il important de suivre précisément un protocole établi pour l'élaboration de produits tels que le savon ?

Ce photomontage a été choisi pour monter que pour la fabrication d'un produit d'usage courant, le savon, il est nécessaire de suivre des étapes bien déterminées, qui ont chacune un rôle dans l'élaboration du produit final.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Analyse de protocoles

Commentaires

Cette activité est indispensable à l'analyse de tout protocole d'expérience. Toutes les connaissances acquises tant en chimie organique que sur la réaction chimique doivent être réinvesties.

Réponses

ANALYSER

1. A1, B1 : transformation
A2, A4, B2, B4 : traitement
A3, A5, B3, B5 : identification

COMMUNIQUER

2.

	Synthèse d'un solide	Synthèse d'un liquide
Étape de transformation :		
Montage	« à reflux »	
Température	70°C	reflux ($T_{éb}$ méthanol)
Catalyseur	oui (H_2SO_4)	
Étapes de traitement :		
Montage	Filtre Büchner	Ampoule à décanter
Technique	Essorage	Extraction liquide-liquide
	Lavage	
Séchage	Étuve	Sel anhydre
Élimination solvant	–	Évaporateur rotatif
Étape d'identification :		
Mesure	Mesure de température de fusion	Mesure d'indice de réfraction
Technique	CCM, spectroscopies IR, RMN	
Étape de purification :		
Technique	Recristallisation	Distillation

S'APPROPRIER

3. a. Grâce aux équations de réaction, on peut déduire que :
– pour le protocole A : les réactifs sont l'acide salicylique ($C_7H_6O_3$) et l'anhydride éthanoïque ($C_4H_6O_3$) ;
– pour le protocole B : les réactifs sont l'acide salicylique ($C_7H_6O_3$) et le méthanol (CH_3OH).

b. Protocole A

Produit d'intérêt : acide acétylsalicylique ou aspirine ($C_9H_8O_4$) ; sous produit : acide éthanoïque (CH_3COOH).

Protocole B

Produit d'intérêt : salicylate de méthyle ou essence de Wintergreen ($C_8H_8O_3$) ; sous produit : eau (H_2O).

ANALYSER

4. L'acide sulfurique concentré est un catalyseur. Dans l'écriture de l'équation de réaction, il apparaît sur la flèche symbolisant la transformation.

RÉALISER

5. Pour un solide : $n = \frac{m}{M}$.

Pour un liquide : $n = \rho \times \frac{V}{M}$.

Voir le tableau en bas de page.

ANALYSER

6. Le réactif limitant est l'acide salicylique. L'équation de réaction fait apparaître une stoechiométrie 1 pour 1 pour les réactifs et l'acide salicylique a été introduit en plus petite quantité que l'acide éthanoïque. L'acide sulfurique concentré est le catalyseur, introduit en très petite quantité.

Il n'y a pas de solvant introduit lors de cette synthèse.

VALIDER

7. La quantité de matière d'aspirine obtenue est :

$$n_{obtenu} = \frac{m_{obtenue}}{M_{aspirine}} = \frac{6{,}2}{180} = 3{,}4 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

Le rendement est défini par :

$r = \frac{n_{obtenu}}{n_{max}}$. Ici $n_{max} = 4{,}3 \times 10^{-2}$ mol.

Le rendement est égal à 79 %.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Étape de transformation

Commentaires

Conformément au programme, une identification des différents paramètres d'expérience va être réalisée afin que l'élève puisse se rendre compte que l'expérimentateur peut modifier des paramètres afin d'optimiser la synthèse.

Les paramètres expérimentaux étudiés ici sont : la température de chauffage lors de la transformation, la durée, le rôle du solvant. Des notions abordées en classe de 1re S sur les interactions entre molécules doivent être réinvesties, en particulier pour interpréter la notion de solubilité d'une espèce chimique dans un solvant.

Lors de la réalisation d'expériences au laboratoire, les aspects liés à la sécurité sont primordiaux. Non seulement, il faut prendre en compte la toxicité des espèces chimiques pour les manipuler correctement, mais certaines étapes nécessitent des précautions particulières lors de la réalisation.

Réponses

1. Choix des paramètres expérimentaux

A. Température

RÉALISER

a. Faire apparaître sur le schéma légendé : support élévateur (nécessaire à la sécurité du montage), chauffe-ballon, ballon, réfrigérant à eau.

ANALYSER

b. Chauffer le milieu réactionnel permet d'augmenter la vitesse de la transformation. En outre, le chauffage permet d'accroître la solubilité des composés dans le solvant.

c. La transformation B se déroule « à reflux » : c'est-à-dire à la température d'ébullition du solvant (ici le méthanol qui joue à la fois le rôle de réactif et de solvant), soit 65 °C.

d. Dans le protocole A, le milieu réactionnel n'est pas chauffé au reflux contrairement au protocole B, il y a risque de dégradation d'espèces chimiques si la température est trop élevée.

VALIDER

e. S'il n'y a pas de risque de dégradation des espèces chimiques, « chauffer à reflux » permet d'atteindre une température lors de l'étape de transformation maximale (celle d'ébullition du solvant) et ainsi d'obtenir une vitesse de transformation la plus élevée possible et une solubilité des réactifs la plus élevée possible (la solubilité augmentant généralement avec la température).

B. Solvant

ANALYSER

a. Le méthanol joue à la fois le rôle de réactif et de solvant dans le protocole B. Il est introduit en très large excès.

VALIDER

b. Le méthanol est un solvant polaire. Le méthanol solubilise l'acide salicylique qui est un composé polaire aussi.

c. Il est nécessaire de solubiliser les espèces chimiques introduites dans le ballon afin que la transformation s'effectue en milieu homogène et soit ainsi plus efficace.

d. On chauffe pour que la cinétique soit favorisée (voir paragraphe température).

Tableau de la question 5 de l'activité 1 :

Espèce chimique introduite	État physique	Masse *m* (en *g*) ou volume *V* (en mL) introduit	M (en g·mol^{-1})	Masse volumique (en kg·L^{-1})	Quantité de matière *n* introduite (mol)
Acide salicylique	solide	6,0 g	138,1	–	$4{,}3 \times 10^{-2}$
Anhydride éthanoïque	liquide	12 mL	102,1	1,05	$1{,}2 \times 10^{-1}$
Acide sulfurique concentré	liquide	0,25 mL	98,1	1,84	$4{,}7 \times 10^{-3}$

C. Durée de la transformation

S'APPROPRIER

a. La durée de la transformation pour le protocole B est beaucoup plus importante que pour le protocole A.

ANALYSER

b. Cette durée peut être diminuée si l'expérimentateur joue sur les paramètres expérimentaux précédents : en augmentant la température et en choisissant un solvant qui solubilise les réactifs. La présence d'un catalyseur peut aussi permettre de diminuer le temps de réaction.

2. Aspects liés à la sécurité

a. Pour manipuler l'acide sulfurique concentré corrosif, il faut porter des gants adaptés. Le méthanol s'utilise exclusivement sous une hotte aspirante en prenant les précautions nécessaires à l'utilisation des produits CMR (Cancérigène, Mutagène et Reprotoxique).

b. Le fait de verser de l'acide sulfurique dans le milieu réactionnel peut provoquer un échauffement très brusque et important de la solution qui peut s'accompagner de projections corrosives, d'où les précautions mentionnées.

CONNAÎTRE

c. Pour refroidir une solution, on la plonge dans un bain de glace (mélange glace et eau en équilibre à 0 °C ou glace fondante).

3. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

Étape de traitement

Commentaires

Cette activité se base sur des connaissances expérimentales acquises dès la classe de 2de. L'élève va devoir faire le lien avec sa pratique expérimentale et analyser la séquence des opérations réalisées en fonction de la nature du produit synthétisé (solide ou en solution).

Réponses

1. Protocole A : choix du montage

S'APPROPRIER

a. Le produit d'intérêt a précipité : il est solide.

ANALYSER

b. À la fin de la transformation, il reste dans le milieu réactionnel le réactif en excès (anhydride éthanoïque), le catalyseur (H_2SO_4) et aussi le réactif limitant (acide salicylique) qui n'a pas réagi. Ces espèces se trouvent en solution aqueuse (voir les tableaux de données).

VALIDER

c. Un filtre Büchner associé à une fiole à vide est utilisé pour effectuer la séparation : on réalise un essorage sous pression réduite. La fiole à vide doit être attachée pour être utilisée en sécurité.

Remarque : l'opération s'appelle un essorage ; c'est le solide qui nous intéresse. Si ce sont les espèces en solution qui sont à récupérer, l'opération s'appelle une filtration sous pression réduite.

2. Protocole A : choix des techniques expérimentales utilisées

ANALYSER

a. Le fait de refroidir le contenu du ballon permet de faire précipiter le solide voulu. La solubilité diminuant en général avec la température. On récupère ainsi plus de produit sous forme solide.

b. Les espèces en solution sont éliminées lors des lavages sur Büchner, à savoir l'anhydride éthanoïque et le catalyseur (H_2SO_4).

c. Le lavage est effectué à l'eau glacée pour que l'aspirine sur le filtre soit le moins possible redissous. La solubilité de l'aspirine diminue quand la température diminue (voir les tableaux de données).

d. Placer le solide à l'étuve permet d'éliminer l'eau dont s'est imprégné le solide.

3. Protocole B : choix du montage

S'APPROPRIER

a. Le produit d'intérêt est en solution à la fin de la transformation (milieu homogène).

ANALYSER

b. À la fin de la transformation, il reste dans le milieu réaction le réactif en excès qui est aussi le solvant (méthanol), le catalyseur (H_2SO_4) et aussi le réactif limitant (acide salicylique) qui n'a pas réagi. Ces espèces se trouvent en solution avec le produit d'intérêt.

VALIDER

c. Pour séparer le produit d'intérêt des autres espèces chimiques, une extraction liquide-liquide est envisagée. Elle s'effectue grâce à une ampoule à décanter. Le solvant d'extraction choisi est le cyclohexane (voir tableau de données).

4. Protocole B : choix des techniques expérimentales utilisées

ANALYSER

a. On récupère plus de produit d'intérêt lorsque l'on extrait deux fois avec 15 mL de solvant d'extraction plutôt qu'une fois avec 30 mL de solvant.

b. Le lavage avec la solution d'hydrogénocarbonate de sodium permet d'obtenir un milieu neutre. Le brut réactionnel était très acide avant lavage.

$$H_3O^+ + HCO_3^- (aq) = CO_2 (g) + 2\ H_2O (\ell)$$

Les espèces acides sont éliminées, il y a dégagement de $CO_2(g)$.

c. Le fort dégagement gazeux de CO_2 provoquerait de très fortes surpressions dans l'ampoule à décanter, d'où un danger de projection de solution.

d. Le lavage à l'eau permet de revenir à un pH neutre. La présence d'acide ou de base pourrait gêner lors de traitements ultérieurs du produit d'intérêt.

VALIDER

e. En phase organique sont présentes les espèces chimiques suivantes : le salicylate de méthyle, éventuellement l'acide salicylique n'ayant pas réagi, le solvant cyclohexane, de l'eau à l'état de traces.

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Étapes d'identification et de purification

Commentaires

Cette activité se base sur des techniques d'identification utilisées dès la classe de seconde. L'élève devra extraire et exploiter les résultats d'expérience et commenter ces résultats. Cette activité a pour but de faire réaliser à l'élève qu'il existe des techniques d'analyse propres aux solides et aux liquides et d'autres qui sont communes. L'élève devra utiliser les connaissances acquises sur les techniques d'analyse (CCM, analyse de spectres).

Réponses

1. Étape d'identification

S'APPROPRIER

a. *Techniques d'identification mises en œuvre*

– Protocole A (synthèse d'une espèce solide) : mesure de température de fusion, CCM.

– Protocole B (synthèse d'une espèce liquide) : mesure d'indice de réfraction, spectre IR.

ANALYSER

b. *Produit formé*

– Protocole A : synthèse d'une espèce solide.

CCM : le produit brut contient un mélange d'acide salicylique (réactif) et d'aspirine.

Ceci est confirmé par l'analyse de la température de fusion du produit brut qui est différente de celle de l'aspirine pure.

– Protocole B : synthèse d'une espèce liquide.

La mesure de l'indice de réfraction est proche de celle du produit pur.

L'analyse du spectre IR montre la présence d'un groupe caractéristique hydroxyle (présent dans le réactif et le produit) et d'un groupe caractéristique C=O. Étant donné le nombre d'onde, on peut conclure à la présence d'une fonction ester.

L'impureté majoritaire est l'acide salicylique dans les deux cas.

VALIDER

c. Pour le protocole A, il est nécessaire de purifier le produit brut obtenu. Ce n'est pas le cas pour le protocole B.

La réalisation d'une CCM peut être envisagée pour confirmer la pureté du produit pour le protocole B, ainsi que la réalisation d'un spectre RMN.

2. Étape de purification

S'APPROPRIER

a. *Techniques de purification envisagées*

– Protocole A : synthèse d'une espèce solide ; recristallisation.

– Protocole B : synthèse d'une espèce liquide ; distillation.

RÉALISER

b. Protocole A : schéma du montage ; ballon + réfrigérant avec bloc de chauffage et élévateur.

Protocole B : schéma du montage de distillation (voir classe de 2de).

COMMUNIQUER

c. Le but d'une recristallisation est de purifier un produit brut solide.

La recristallisation est basée sur la différence de solubilité à chaud et à froid du produit d'intérêt et de l'impureté (réactif en général) dans un solvant donné.

À chaud, le produit d'intérêt et l'impureté sont solubles. À froid, seul le produit d'intérêt précipite. Il est alors séparé par essorage sur filtre Büchner.

La recristallisation se fait à température d'ébullition du solvant (température maximale pouvant être obtenue) pour que la solubilité à chaud soit la plus grande possible. En effet, il faut toujours travailler avec un minimum de solvant de recristallisation afin de récupérer le maximum de produit d'intérêt solide à froid.

5. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Comparaison de deux protocoles

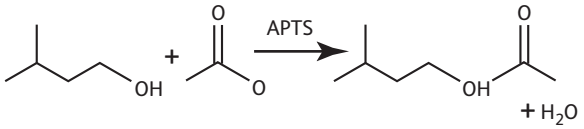
Commentaires

Cette activité permet de comparer deux protocoles expérimentaux. L'élève pourra ainsi se rendre compte que de nombreux paramètres sont à prendre en compte avant d'envisager une manipulation et en particulier les aspects coût et sécurité.

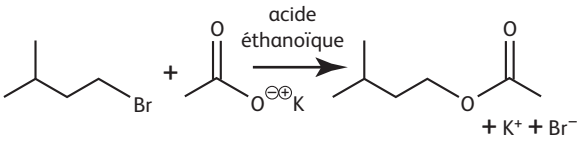
RÉPONSES

Réaliser

1. a. • Protocole A



• Protocole B



b. – Protocole A :

alcool isoamylique : 0,32 €

(Remarque : il est nécessaire de retrouver la masse volumique de l'alcool ρ(alcool) = 0,81 kg·L^{-1}.)

acide éthanoïque : 1,12 € ;

APTS : 0,21 € ;

soit un total de 1,65 €.

– Protocole B :

éthanoate de potassium : 0,25 € ;

acide éthanoïque : 0,30 € ;

bromure d'isoamyle : 0,43 € ;

soit un total de 0,98 €.

ANALYSER

2. a. Avant de manipuler les espèces chimiques mises en jeu, il faut regarder les pictogrammes de sécurité pour savoir quels équipements utiliser. Ici, il faut travailler avec gants, lunettes et blouse.

b. On oublie souvent le coût et l'aspect lié à la sécurité des déchets chimiques issus des manipulations. Il faut trier les déchets et les faire éliminer correctement.

ANALYSER

3. A priori les deux protocoles sont réalisables dans le temps d'un TP en classe. Le protocole A est plus adapté car la durée de la transformation est plus courte. La dangerosité des produits et le coût sont similaires.

Il faut faire l'expérience pour savoir quelle synthèse donne le meilleur rendement.

EXERCICES Appliquer le cours

Analyse de protocoles (Bilan 1)

16. Déterminer des quantités de matière

a. La formule brute du 2-nitrobenzalhédyde est $C_7H_5O_3N$. Sa masse molaire est $M_1 = 151$ g·mol^{-1}. La quantité de matière introduite est $n_1 = \frac{m_1}{M_1} = 3{,}3 \times 10^{-3}$ mol.

b. La quantité de matière d'acétone (C_3H_6O ; $M_2 = 58$ g·mol^{-1}) introduite est :

$n_2 = V_2 \times \frac{d}{M_2} = 1{,}4 \times 10^{-1}$ mol.

c. La quantité de matière d'ions hydroxyde introduite est

$$n_3 = C \times V = 5 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

d. L'eau distillée sert de solvant.

17. Identifier le réactif limitant

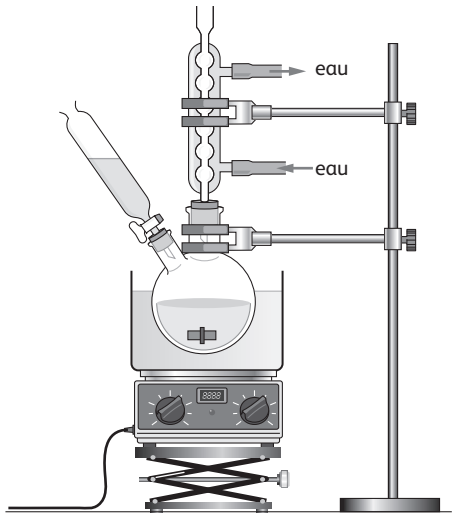
a.

Espèce chimique	2-nitro-benzaldhéhyde	acétone	hydroxyde de sodium (NaOH)
État physique	solide	liquide	en solution
Masse	0,500 g	/	/
Volume	/	10 mL	2,5 mL
Concentration	/	/	2 mol·L^{-1}
Masse molaire	151 g·mol^{-1}	58 g·mol^{-1}	40 g·mol^{-1}
Densité	/	0,79	/
Quantité de matière	$3{,}3 \times 10^{-3}$ mol	$1{,}4 \times 10^{-1}$ mol	5×10^{-3} mol

b. Vu les nombres stœchiométriques, le 2-nitrobenzaldéhyde est le réactif limitant.

Étape de transformations (Bilan 2)

18. Réaliser le schéma d'un montage



19. Respecter les consignes de sécurité

a. Pendant une séance de TP, on doit obligatoirement porter une blouse en coton fermée et des lunettes de protection.

b. Pour éviter les irritations cutanées, il faut utiliser des gants pour manipuler cette espèce chimique. De plus, il est préférable de manipuler le solide sous hotte pour éviter de respirer les poussières de solide. Une fois le solide en solution, la synthèse peut alors être réalisée à la paillasse.

Étape de traitement (Bilan 3)

20. Choisir les techniques de traitement

a. Afin de séparer le produit solide formé du reste du mélange réactionnel, il faut essorer le solide, puis le laver.

b. Ces opérations sont effectuées grâce à un filtre Büchner placé sur une fiole à vide.

Étapes d'identification et de purification (Bilan 4)

21. Choisir les techniques d'analyse, de purification

a. Pour analyser le solide obtenu, on peut envisager de mesurer une température de fusion, de réaliser une CCM, de réaliser des analyses spectrales (RMN, IR ou UV, le produit est coloré).

b. Pour purifier un solide, on réalise une recristallisation.

22. Analyser un résultat expérimental

Le rendement de la synthèse est défini par $r = \frac{n_{obtenu}}{n_{max}}$; n_{obtenu} quantité de matière de produit d'intérêt obtenu et n_{max} quantité de matière maximale que l'on obtiendrait si la réaction était totale.

D'après l'exercice 17, le réactif limitant est le 2-nitrobenzaldéhyde.

La masse molaire de l'indigo ($C_{16}H_{10}O_2N_2$) est égale à $M_3 = 262$ g·mol^{-1}.

$n_{obtenu} = \dfrac{0{,}375}{262} = 1{,}43 \times 10^{-3}$ mol.

$n_{max} = \dfrac{n_{réactif\ limitant}}{2} = \dfrac{3{,}3 \times 10^{-3}}{2} = 1{,}65 \times 10^{-3}$ mol

(Attention aux nombres stœchiométriques : il faut 2 moles de 2-nitrobenzaldéhyde pour former 1 mole d'indigo.)

$r = 86{,}5$ %

23. Exercice résolu dans le manuel

24. Application de l'exercice résolu

1. Lors d'un contrôle d'alcoolémie, on veut mesurer la quantité d'éthanol présente dans l'air expiré. C'est donc l'éthanol qui doit être le réactif limitant.

2. Masse d'éthanol contenue dans un litre d'air expiré pour un taux d'alcoolémie limite :

$m_1 = 2{,}5 \times 10^{-4}$ g.

Quantité d'éthanol correspondante :

$n_1 = \dfrac{m_1}{M_1} = \dfrac{2{,}5 \times 10^{-4}}{46} = 5{,}4 \times 10^{-6}$ mol.

D'après l'équation de la réaction, il faut 1 mole d'ions dichromate pour oxyder complètement 3 moles d'éthanol. La quantité minimale d'ions dichromate nécessaire est donc $n_{2_{min}} = \dfrac{n_1}{3} = 1{,}8 \times 10^{-6}$ mol, soit une masse minimale de dichromate de potassium présente dans l'éthylotest $m_{2_{min}} = n_{2_{min}} \times M_2 = 5{,}4 \times 10^{-4}$ g soit 0,6 mg.

25. Exercice résolu dans le manuel

26. Application de l'exercice résolu

1. En examinant le chromatogramme, on voit que le produit synthétisé n'est pas un produit pur (deux taches révélées pour le dépôt *C*). Le dépôt *C* contient principalement du paracétamol, mais aussi un peu de *para*aminophénol qui n'a pas réagi. Il faut donc purifier le brut réactionnel.

2. Pour purifier un solide, la technique de recristallisation est utilisée.

EXERCICES S'entraîner

27. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, communiquer.**

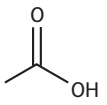
a. Les réactifs sont le paraaminophénol et l'anhydride éthanoïque. Le produit d'intérêt est le paracétamol. Il se forme aussi un autre produit puisque il y a conservation des éléments lors d'une transformation chimique.

b. L'équation de la réaction s'écrit :

$$C_6H_7NO + C_4H_6O_3 \longrightarrow C_8H_9NO_2 + C_2H_4O_2$$

*para*aminophénol + anhydride éthanoïque → paracétamol + acide éthanoïque

Le produit formé est de l'acide éthanoïque de formule topologique :



c. Le réactif limitant choisi sera le *para*aminophénol, pour des raisons de coût principalement. C'est le réactif le moins cher.

28. ★ Synthèse d'un savon

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser.**

a. ① Étape de transformation

Dans un ballon monocol, introduire de l'huile, de la soude et de l'éthanol. Porter le mélange à reflux.

② Étape de traitement

Laisser refroidir le milieu réactionnel et le verser dans une solution aqueuse salée. Le savon précipite.

③ Étape de traitement

Essorer le savon formé sur un filtre plissé.

b. Les données qui ne sont pas spécifiées sur le schéma sont les quantités de réactifs et solvant introduites, la durée de la transformation, la concentration de la solution aqueuse salée.

c. On peut compléter le protocole en **a.** avec les quantités de réactifs suivantes : 20 mL d'huile alimentaire, 20 mL de solution d'hydroxyde de sodium de concentration environ 10 mol·L^{-1} et environ 20 mL d'éthanol.

Durée de réaction : 15 min à reflux. La solution aqueuse de chlorure de sodium est saturée.

29. ★ In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, réaliser.**

a. Les réactifs sont le 1-bromobutane et les ions iodure (I^-). Le solvant est l'acétone.

b.

$$C_4H_9Br + I^- + Na^+ \xrightarrow{\text{acétone}} C_4H_9I + Br^- + Na^+$$

c. Le réactif limitant est le 1-bromobutane.

30. ★ Choix d'un solvant d'extraction

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyse, communiquer.**

a. La solution présente un aspect laiteux car c'est une émulsion : fines gouttelettes de phase organique (eugénol) dans l'eau. C'est le phénomène de diffusion.

b. Pour récupérer l'eugénol, on va utiliser la technique d'extraction liquide-liquide.

c. Les critères de choix d'un solvant d'extraction (programme de 2de) sont les suivants :

– l'espèce à extraire doit être plus soluble dans le solvant extracteur que dans le solvant initial (ici l'eau) ;

– le solvant extracteur et le solvant initial ne doivent pas être miscibles.

On peut donc utiliser l'éther et le dichlorométhane sur ces deux critères. De plus, le solvant d'extraction devra être éliminé grâce à un évaporateur rotatif.

Remarque : il sera plus facile d'éliminer un solvant de faible température d'ébullition ; $T_{éb}$ (éther) = 35 °C, $T_{éb}$ (dichlorométhane) = 40 °C.

d. Protocole expérimental :

Verser dans une ampoule à décanter la solution laiteuse contenant l'eugénol.

Ajouter 20 mL d'éther. Agiter l'ampoule à décanter en dégazant de temps en temps. Laisser la décantation se faire. Séparer les phases. Extraire la phase aqueuse avec deux fois 20 mL d'éther. Rassembler les phases organiques.
Sécher la phase organique obtenue sur sulfate de magnésium anhydre, filtrer et évaporer le solvant à l'évaporateur rotatif.

31. ★★ Réaction de Cannizzaro

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. Les réactifs sont le benzaldéhyde et les ions hydroxyde HO^-. Les produits sont l'acide benzoïque et l'alcool benzylique.

b. La quantité de matière d'ions hydroxyde introduits est $n_1 = \frac{m_1}{M_1} = \frac{10}{56} \approx 1{,}8 \times 10^{-1}$ mol (l'hydroxyde de potassium est un sel qui se dissocie totalement dans l'eau).
La quantité de matière de benzaldéhyde introduit est $n_2 = V_2 \times \frac{d_2}{M_2} = \frac{10 \times 1{,}05}{106} = 1{,}0 \times 10^{-1}$ mol.
Étant donnée la stœchiométrie de la réaction, c'est le benzaldéhyde qui est le réactif limitant.

c. Étape de transformation
La dissolution de l'hydroxyde de potassium fournit de l'énergie au milieu. La solution peut s'échauffer fortement. Il faut donc plonger l'erlenmeyer où a lieu la dissolution dans un bain de glace.
Le benzaldéhyde doit être ajouté sous hotte car il est nocif par inhalation.

d. Étape de traitement
Les différentes espèces chimiques présentes après ajout d'eau sont les produits (acide benzoïque et alcool benzylique) et les réactifs n'ayant pas réagi (les ions hydroxyde en excès et éventuellement le benzaldéhyde restant). Le milieu est donc fortement basique.
L'acide benzoïque possède des propriétés acido-basiques.
Si $pH < pK_a - 1$, l'acide benzoïque se trouve sous forme moléculaire $C_6H_5CO_2H$.
Si $pH > pK_a + 1$, l'acide benzoïque se trouve sous forme ionique $C_6H_5CO_2^-$.
À ce stade l'acide benzoïque se trouve sous forme ionique. L'alcool benzylique et le benzaldéhyde sont sous forme moléculaire.

e. Après extraction liquide-liquide, il y a deux phases distinctes : une phase aqueuse et une phase organique.
Les espèces chimiques qui se trouvent en phase aqueuse sont ioniques ou ont des interactions privilégiées avec le solvant polaire H_2O. Celles qui se trouvent en phase organique ont plus d'affinités avec le solvant organique éthoxyéthane.
Dans la phase aqueuse se trouve donc l'acide benzoïque sous forme d'ions benzoate, et dans la phase organique l'alcool benzylique (et éventuellement du benzaldéhyde).

f. On acidifie ensuite la phase aqueuse pour transformer l'acide benzoïque ionique en acide benzoïque moléculaire (réaction de type acide-base). En solution acide, l'acide benzoïque précipite donc ; on peut ainsi le récupérer par essorage.

g. Le produit solide est donc l'acide benzoïque, le liquide est l'alcool benzylique.

32. ★★ Oxydation de l'alcool benzylique

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. Les réactifs sont l'alcool benzylique et les ions hypochlorite. Le produit est le benzaldéhyde.

b. On observe une phase aqueuse (solvant eau) et une phase organique (solvant acétate d'éthyle).

c. Dans la phase aqueuse se trouvent les ions hypochlorite, dans la phase organique se trouve l'autre réactif, l'alcool benzylique.

d. Les deux réactifs se trouvent dans deux phases différentes. Or lors de l'étape de transformation, il faut que les réactifs soient en contact. On utilise donc du bromure de tétrabutylammonium qui permet de transférer un réactif d'une phase à une autre pour que la transformation ait lieu (ici les ions hypochlorite « passent » en phase organique). Cette espèce chimique n'apparaît pas dans le bilan de la réaction et permet à la transformation d'avoir lieu, d'où son nom de « catalyseur de transfert de phase ».

e. Le réactif limitant est l'alcool benzylique. Le rendement de cette synthèse est :

$r = \frac{n_{obtenu}}{n_{max}}$; $n_{obtenu} = \frac{0{,}880}{106} = 8{,}3 \times 10^{-3}$ mol ;

$n_{max} = 10 \times 10^{-3}$ mol ; $r = 83\ \%$.

L'analyse CCM montre que le brut réactionnel contient du benzaldéhyde mais aussi de l'alcool benzylique (deux taches). Il est nécessaire de purifier le brut réactionnel par recristallisation.

33. ★★ S'auto-évaluer

Tableau d'engagement :

Espèce chimique	Benzile	$NaBH_4$	Éthanol
État physique	solide	solide	liquide
Masse	2,0 g	0,4 g	/
Volume			20 mL
Masse molaire	210	37,8	46,0
Densité	/	/	0,79
Quantité de matière	$9{,}5 \times 10^{-3}$ mol	$1{,}1 \times 10^{-1}$ mol	$3{,}4 \times 10^{-1}$ mol

Les réactifs sont le benzile et le tétrahydroborate de sodium. L'éthanol est le solvant (introduit en large excès).
Étant donné la stœchiométrie de la réaction, le réactif limitant est le benzile. De plus, une mole de benzile fournit une mole de produit.
Le rendement d'une synthèse est défini par :

$$r = \frac{n_{obtenu}}{n_{max}}$$

n_{obtenu} quantité de matière de produit d'intérêt obtenu et n_{max} quantité de matière maximale que l'on obtiendrait si la réaction était totale.
Ici $n_{max} = 9{,}5 \times 10^{-3}$ mol.
La masse molaire du produit se déduit de celle du réactif, elle est égale à $M_4 = M_2 + 4 \times M_H = 214$ g·mol^{-1}.

$$n_{obtenu} = \frac{1{,}5}{214} = 7{,}0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

$r = 74$ %.

34. Synthèse d'un arôme

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. La réaction envisagée est une substitution.

b. L'alcool isoamylique et l'acide éthanoïque sont les réactifs, l'APTS est un catalyseur.

c. L'acide éthanoïque est en très large excès ($n_{acide} = 5{,}3 \times 10^{-1}$ mol) et joue aussi le rôle de solvant.
Le réactif limitant est l'alcool isoamylique ($n_{alcool} = 9{,}2 \times 10^{-2}$ mol).

d. Après ajout de glace, dans la phase organique, il y a l'alcool isoamylique n'ayant pas réagi et l'acétate d'isoamyle. En phase aqueuse, il y a l'acide éthanoïque.
Remarque : L'APTS (sous forme acide) est plus soluble en phase organique. En milieu acide une partie de l'acide éthanoïque est soluble en phase organique.

e. L'étape de lavage de la phase organique avec une solution basique de carbonate de sodium, permet d'éliminer l'excès d'acide acétique et d'APTS utilisé lors de la réaction. En effet, les ions paratoluènesulfonate et éthanoate formés par réaction acide-base sont solubles dans l'eau et passent en phase aqueuse. On effectue un dernier lavage à l'eau pour s'assurer que la phase aqueuse finale est bien neutre. On a ainsi éliminé toute trace d'acides par lavage, d'où le terme de « lavage à neutralité ».

f. Le dégagement gazeux observé est du dioxyde de carbone produit par réaction acide-base entre les ions carbonate (CO_3^{2-}) et les acides présents.

$$2\ H_3O^+ + CO_3^{2-}\ (aq) = CO_2(g) + 3\ H_2O\ (\ell)$$

g. La synthèse a permis de synthétiser $n_{obtenu} = 5{,}9 \times 10^{-2}$ mol d'ester. Le rendement calculé par rapport à l'alcool est alors de 64 %.

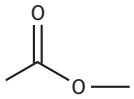
h. La valeur de l'indice de réfraction mesuré est en bon accord avec celui tabulé. On peut donc estimer que le produit synthétisé est pur et n'a donc pas besoin de purification.
Remarque : pour caractériser le produit obtenu, une CCM pourrait être réalisée ainsi que des spectres IR et/ou RMN.

EXERCICES Objectif BAC

35. SYNTHÈSE DE L'ACÉTATE D'ÉTHYLE

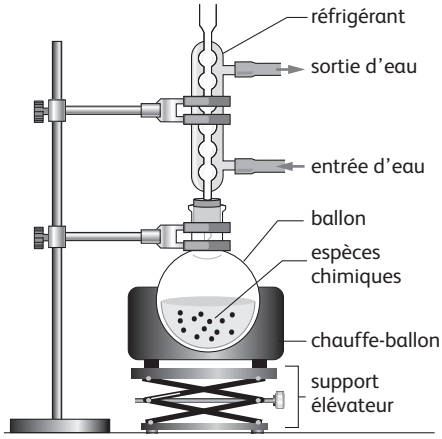
> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. a. Réactifs utilisés : acide éthanoïque (classe fonctionnelle : acide carboxylique), éthanol (classe fonctionnelle : alcool).
Produit d'intérêt : acétate d'éthyle (classe fonctionnelle : ester).



b. L'acétate d'éthyle se nomme éthanoate d'éthyle.

2. a. Pour réaliser l'étape 1, il faut réaliser un montage à reflux.



b. Étape 1 : étape de transformation ; synthèse de l'ester.
Étape 2 : étape de traitement ; décantation et extraction liquide-liquide.
Étape 3 : étape de traitement ; lavage à neutralité et séchage de la phase organique.

c. L'acide sulfurique est un **catalyseur** de la réaction (accélère la transformation). Il n'apparaît pas dans l'équation de la réaction.
Le chauffage à reflux sert à **réduire la durée de réaction** (quand la température augmente, la vitesse de la transformation augmente) tout en évitant les pertes de matière (les vapeurs se condensent et retombent dans le milieu réactionnel).
Le mélange avec de l'eau salée permet de réaliser une **extraction liquide-liquide.** Sont alors en présence une phase organique et une phase aqueuse. L'ester contenu dans le brut réactionnel est peu soluble dans l'eau salée tandis que les acides, l'alcool et l'eau sont très solubles dans l'eau salée. L'ester se retrouve en phase organique.
L'ajout d'une solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium permet **d'éliminer les traces d'acides** (éthanoïque et sulfurique) restant dans la phase organique selon l'équation de réaction :
$H^+(aq) + HCO_3^-(aq) \rightarrow H_2O, CO_2(aq)$ ce qui provoque un dégagement gazeux de CO_2.

3. a. Le rendement d'une synthèse est défini par :

$$r = \frac{n_{obtenu}}{n_{max}}$$

n_{obtenu} quantité de matière de produit d'intérêt obtenu et n_{max} quantité de matière maximale que l'on obtiendrait si la réaction était totale.

Expérimentalement, on obtient un volume d'ester : $V_{ester} = 5{,}9$ mL.
La quantité de matière d'ester obtenu est :

$$n_{obtenu} = V_{ester} \times \frac{\rho_{ester}}{M_{ester}}$$

$$\text{A. N. : } n_{obtenu} = \frac{5{,}9 \times 0{,}925}{88{,}1} = 6{,}2 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

Pour déterminer n_{max}, il faut déterminer le réactif limitant de cette synthèse. Ici le mélange est équimolaire : 0,10 mol d'acide éthanoïque ; 0,10 mol d'éthanol. Les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques. Les deux réactifs sont limitants en même temps et $n_{max} = 0{,}10$ mol. D'où $r = 62$ %.

3. b. Le rendement est théoriquement égal à la proportion d'éthanol consommé au cours de la transformation mais expérimentalement il est inférieur car il faut tenir compte des pertes de produit lors des étapes de traitement (2 et 3).

36. SYNTHÈSE DE LA SACCHARINE

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

1. a. Tableau d'engagement :

Espèce chimique	2-aminosulfonyl-benzoate de méthyle	$NaHCO_3$	Eau
État physique	solide	solide	liquide
Masse	3,22 g	1,51 g	/
Volume	/	/	50 mL
Masse molaire	215,23	84,00	18,00
Densité	/	/	1,00
Quantité de matière	$1{,}50 \times 10^{-2}$ mol	$1{,}80 \times 10^{-2}$ mol	2,78 mol

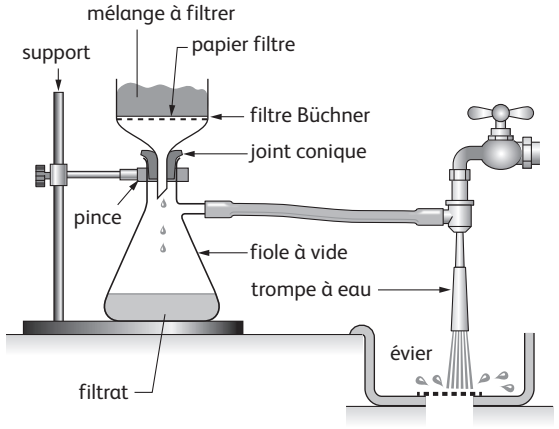
b. Une mole de 2-aminosulfonylbenzoate de méthyle réagit avec une mole d'ions hydrogénocarbonate pour donner une mole de saccharine, d'après le document 1. Donc le réactif limitant est le 2-aminosulfonylbenzoate de méthyle et la quantité de matière de saccharine maximale que l'on peut obtenir si la réaction est totale est $n_{max} = 1{,}50 \times 10^{-2}$ mol, soit une masse maximale de saccharine $m_{max} = n_{max} \times M_{saccharine} = 2{,}74$ g.

c. On obtient une masse de saccharine de 2,3 g. Le rendement est donc égal à $r = \frac{2{,}3}{2{,}74} = 0{,}84$, soit 84 %.

2. a. L'eau joue le rôle de solvant (introduite en très grande quantité).

b. On place le ballon dans un bain eau + glace, car lors de l'étape de traitement 5, on ajoute de l'acide chlorhydrique. La réaction acide-base qui se produit est très exothermique (dégage de l'énergie thermique).

c.



d. Le but d'une recristallisation est de purifier un produit brut solide.
Étapes de la recristallisation :
– le solide impur est solubilisé à chaud dans un minimum de solvant de recristallisation (en général on utilise le même montage que pour le chauffage à reflux pour éviter les pertes de matière) ;
– on laisse refroidir lentement, afin d'obtenir de beaux cristaux ;
– on essore le solide sur filtre Büchner.

3. a. Le spectre numéro 1 est celui de la saccharine. Dans les deux spectres, on observe un massif vers 8 ppm correspondant aux protons présents sur le cycle benzénique. Sur le spectre numéro 1, il n'y a qu'un seul autre pic. Le spectre numéro 1 ne possède donc qu'un seul autre type de protons : c'est donc la saccharine (il reste un H lié à l'azote non couplé avec un autre proton, donc la forme de singulet).
Remarque : le déplacement chimique de ce proton est très élevé. En effet, du fait de la présence les atomes d'azote et d'oxygène voisins, le proton est très déblindé. Le spectre numéro 2 fait apparaître deux signaux supplémentaires, un pour les 3 H du groupement méthyle, un pour les 2 H du groupe amino.

b. Pour identifier le produit synthétisé, on aurait pu mesurer sa température de fusion, réaliser une CCM ou enregistrer un spectre IR.

37. SYNTHÈSE D'UNE MOLÉCULE ODORANTE : LE MÉTHANOATE D'ÉTHYLE

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.**

Les trois protocoles proposés ont pour but de réaliser la même transformation :
acide méthanoïque + éthanol → méthanoate d'éthyle + eau.
Le protocole 1 utilise un montage à reflux, mais pas de catalyseur : on n'obtient pas d'ester.
Le protocole 2 utilise un montage à reflux et un catalyseur (H_2SO_4). On obtient l'ester avec un rendement de 67 %, après des étapes de traitement.

Le montage du protocole 3 est plus complexe : la transformation a lieu et l'ester est distillé au fur et à mesure de sa formation. La température de 55 °C obtenue lors de l'expérience confirme la présence d'ester pur dans le distillat. Il faut calculer le rendement pour le protocole 3. Les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. La quantité maximale d'ester que l'on peut récupérer est donc $n_{max} = 0{,}30$ mol. Le volume de distillat est de 23,4 mL. C'est de l'ester pur. La quantité d'ester obtenue est donc égale à :

$$n_{obtenu} \times \frac{V}{M_{ester}} = 0{,}918 \times \frac{23{,}4}{74} = 0{,}29 \text{ mol.}$$

Le rendement $r = \frac{n_{obtenu}}{n_{max}} = \frac{0{,}29}{0{,}30} = 0{,}97$ soit 97 %.

Le protocole 3 sera donc choisi car il conduit à un ester pur avec un meilleur rendement.
Remarque : pour le protocole 3, il n'y a pas de purification ultérieure de l'ester à réaliser.

38. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Synthèse d'un conservateur

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

CHAPITRE

23

AGIR

Sélectivité en chimie organique

> Manuel pages 520 à 541

Choix pédagogiques

Ce chapitre est lié au chapitre 22 sur la stratégie de synthèse qu'il illustre dans le cas précis de la sélectivité. Il fait par ailleurs appel aux notions du chapitre 14 : atomes donneurs et accepteurs de doublet d'électrons. Les élèves n'ont pas à connaître la réactivité des diverses classes fonctionnelles étudiées, mais ils doivent pouvoir identifier plusieurs sites accepteurs de doublet sur une même molécule et ainsi interpréter la formation de plusieurs produits.
Le cours de ce chapitre précise tout d'abord la notion de réactif chimiosélectif et de réaction sélective. Les notions de stéréosélectivité et de régiosélectivité sont hors programme.
Après avoir fait émerger la nécessité de la protection, la stratégie de synthèse d'une espèce avec protection puis déprotection d'un groupe caractéristique est exposée. Les inconvénients de cette méthode, peu efficace en terme de rendement, sont précisés. Le chapitre se termine par l'étude du cas particulier de la synthèse peptidique, conformément aux exigences du programme. L'activation du groupe carboxyle est seulement évoquée mais n'est pas détaillée.
La nomenclature des espèces polyfonctionnelles est traitée au chapitre 14 ainsi que dans la fiche méthode 1.
Des animations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

OUVERTURE DE CHAPITRE

L'acide salicylique est une espèce chimique polyfonctionnelle : il appartient à la classe fonctionnelle des alcools et des acides carboxyliques.

Peut-on prévoir comment les groupes caractéristiques « sélectionnent ceux avec lesquels ils réagissent ? »

L'aspirine est une molécule qui appartient au quotidien des élèves ; par ailleurs on peut aisément la synthétiser en classe. Ce premier questionnement permet donc à la fois de revoir la nomenclature et de comprendre la problématique de la sélectivité en chimie organique.

ACTIVITÉS

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

Qu'est-ce qu'un réactif chimiosélectif ?

Commentaires

Nous souhaitons, dans cette activité, introduire la notion de réactif sélectif en comparant deux réactifs bromants, l'un étant plus sélectif que l'autre, sur deux réactifs monofonctionnels.
Au terme de l'activité, l'élève doit être en mesure de prévoir le produit de réaction pour une espèce polyfonctionnelle.

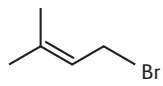
Réponses

S'APPROPRIER

1. a. La transformation qui utilise le bromure d'hydrogène HBr modifie les alcènes et les alcools ; la transformation qui utilise le tribromure de phosphore PBr_3 modifie les alcools mais pas les alcènes.
b. On étudie deux conditions expérimentales différentes ; elles diffèrent par la nature du réactif bromant.

ANALYSER

2. a. HBr peut transformer le groupe hydroxyle et aussi la double liaison C=C de la molécule tandis que PBr_3 ne modifie pas la double liaison C=C : c'est lui, le réactif chimiosélectif. Un réactif est chimiosélectif s'il réagit uniquement avec un groupe caractéristique à l'exclusion des autres groupes caractéristiques ou double liaison C=C de la molécule.
b. L'espèce chimique appartient à la fois à la classe des alcènes et à celle des alcools.
PBr_3 ne modifie pas la double liaison C=C des alcènes, mais effectue la substitution du groupe hydroxyle –OH des alcools par un atome de Br.
On propose donc le produit suivant :



c. Pour effectuer la transformation du prenol en 3-bromo-3-méthylbutan-1-ol en une seule étape, il faut utiliser un réactif chimiosélectif qui a la propriété de réagir avec la double liaison C=C mais sans transformer le groupe hydroxyle.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Comparaison de deux voies de synthèse

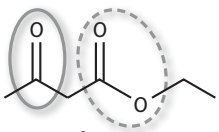
Commentaires

Cette activité vient en complément de la précédente. Nous avons montré dans cette dernière que pour obtenir un produit, il faut parfois envisager l'utilisation d'un réactif chimiosélectif ; cette voie correspond à une **voie directe**. Dans cette deuxième activité, nous envisageons l'utilisation d'un réactif qui n'est pas chimiosélectif (en effet, un réactif chimiosélectif n'est pas toujours disponible pour la transformation souhaitée). Nous exposons alors la **voie indirecte** qui passe par une étape de protection puis de déprotection du groupe caractéristique qui ne doit pas être modifié.

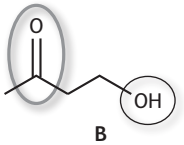
Réponses

S'APPROPRIER

1. a.



A



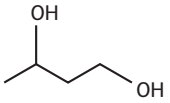
B

Trait plein : groupe carbonyle.
Pointillés : groupe ester.
Trait fin : groupe hydroxyde.

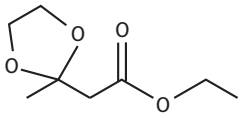
b. Il faut modifier le groupe caractéristique des esters pour transformer A en B.

ANALYSER

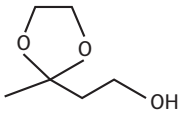
2. a. D'après le document 3, $LiAlH_4$ réduit les esters en alcool primaire et les cétones en alcool secondaire. On obtient :



b. D'après le document 2, lors de l'étape 1, on forme un acétal sur la fonction carbonyle, on obtient :



Lors de l'étape 2, $LiAlH_4$ réduit le groupe caractéristique des esters en groupe hydroxyle :



Enfin lors de l'étape 3, l'acétal est hydrolysé ; le groupe carbonyle est régénéré : on obtient **B**.

RÉALISER

3. Supposons que chacune des étapes soit réalisée avec le même rendement noté p_n ; le rendement global sera noté p_G.

Déterminons les masses molaires.

Espèce	A	Acétal oxydé a,o	Acétal réduit a,r	B
M (g·mol^{-1})	$M_A = 130$	$M_{a,o} = 174$	$M_{a,r} = 132$	$M_B = 88$

$p_n = \dfrac{M_{a,o}}{M_A} = \dfrac{M_{a,r}}{M_{a,o}} = \dfrac{M_B}{M_{a,r}}$ puisque la stoechiométrie de chaque étape est 1:1.

$p_G = \dfrac{M_B}{M_A} = p_n^3$ d'où $p_n = \sqrt[3]{p_G} = \sqrt[3]{0{,}4} = 0{,}74$.

On remarque que même si chacune des étapes se fait avec un assez bon rendement, la multiplication des étapes fait considérablement chuter le rendement.

COMMUNIQUER

4. a. Une réaction sélective est une transformation au cours de laquelle un groupe caractéristique d'une espèce polyfonctionnelle est transformé à l'exclusion de tous les autres.

b. L'étape 1 correspond à la protection.
L'étape 2 correspond à la réaction.
L'étape 3 correspond à la déprotection.

c. La transformation de **A** en **B** correspond à la réduction du groupe caractéristique des esters en alcool. On envisage d'utiliser $LiAlH_4$ pour effectuer cette réduction.
Néanmoins, la présence d'un groupe carbonyle sur le réactif ne permet pas d'utiliser $LiAlH_4$ directement ; ce réactif réduit les groupes carbonyles en groupes hydroxyles : on n'obtient pas **B**. Il est donc indispensable de procéder préalablement à la protection du groupe carbonyle puis, après réduction, à sa déprotection afin d'obtenir le produit souhaité.

3. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Synthèse du paracétamol

Commentaires

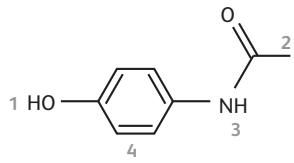
La manipulation permet d'utiliser un montage à reflux et un filtre Büchner. On peut éventuellement faire réaliser la recristallisation par les élèves.
La caractérisation du produit obtenu se fait par mesure de la température de fusion ; le spectre de RMN permettant de vérifier cette détermination.

Réponses

VALIDER

2. a. Le paracétamol est le *N*-(4-hydroxyphényl)éthanamide de température de fusion 171 °C.

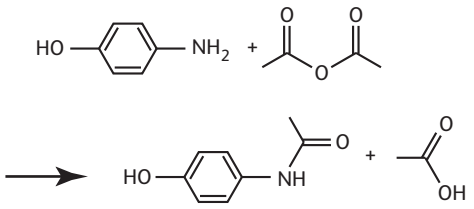
b. Singulet à 2 ppm → atomes d'hydrogène sur le carbone n° 2.
Doublets à 6,8 et 7,2 ppm → atomes d'hydrogène sur le carbone n° 4.



Singulets à 9 et 9,6 ppm → atomes d'hydrogène sur le carbone n° 1 et 3.

ANALYSER

3. a. L'équation de la réaction est :



b. La transformation est sélective, la transformation n'affecte pas le groupe hydroxyle du 4-aminophénol.

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Synthèse de l'aspartame

Commentaires

Cette activité illustre une stratégie de protection et de déprotection dans le cas de la synthèse peptidique, conformément aux exigences du programme.

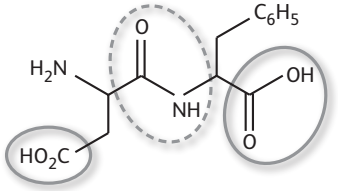
Nous avons choisi comme exemple l'aspartame car c'est une molécule familière. Par ailleurs, la présence de deux groupes carboxyles sur la molécule d'acide aspartique peut permettre d'évoquer la régiosélectivité.

Néanmoins, l'aspartame n'est pas rigoureusement un dipeptide dans le sens où le groupe carboxyle est méthylé et donc se trouve sous forme d'ester.

Réponses

S'APPROPRIER

1.



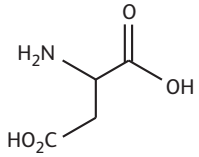
Trait plein : groupe caractéristique des acides carboxyliques.

Pointillés : groupe caractéristique des amides.

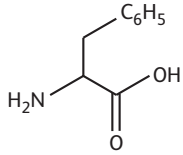
ANALYSER

2. a.

acide aspartique



phénylalanine



b. À partir d'un mélange d'acide aspartique et de phénylalanine, on peut obtenir 4 dipeptides différents.

c. Lors de la synthèse de l'aspartame, le groupe carboxyle de la phénylalanine a été protégé.

d. Lors de cette synthèse, il faut protéger le groupe amino de l'acide aspartique et l'un de ses groupes carboxyles. Pour obtenir l'aspartame, il faut :

– protéger le groupe amino de l'acide aspartique ;

– protéger le groupe carboxyle le plus éloigné du groupe amino de l'acide aspartique ;

– protéger le groupe carboxyle de la phénylalanine ;

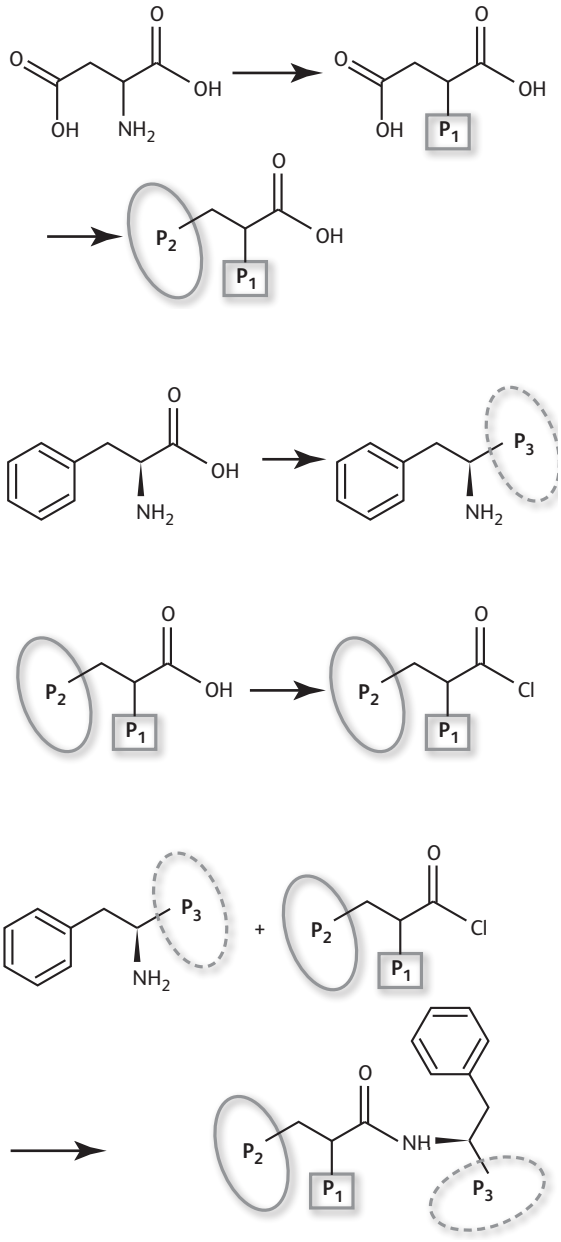
– activer le groupe carboxyle non protégé de l'acide aspartique ;

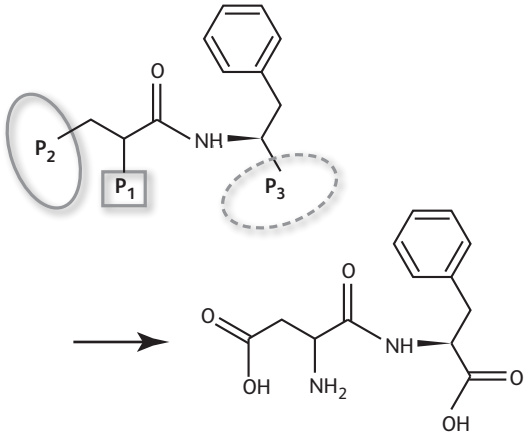
– faire réagir les espèces ainsi obtenues ;

– déprotéger les groupes qui doivent l'être.

COMMUNIQUER

3.

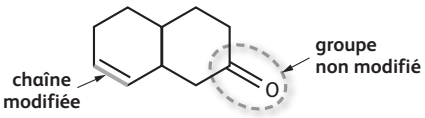




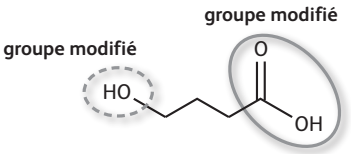
EXERCICES Appliquer le cours

Réaction sélective (§1 du cours)

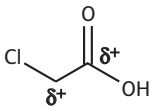
12. Déterminer le caractère sélectif d'une réaction
(1) La transformation est sélective.



(2) La transformation n'est pas sélective.



13. Analyser une réaction sélective
a. L'atome H relié à l'oxygène du phénol est remplacé par $-CH_2COOH$.
b. $\chi(C) < \chi(O)$ et $\chi(C) < \chi(Cl)$ donc l'acide chloroacétique possède deux atomes de carbone engagés dans des liaisons covalentes dont ils sont les atomes les moins électronégatifs.



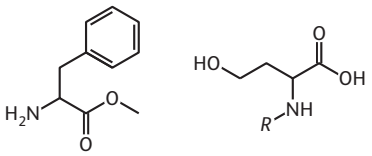
c. Le mouvement de doublet d'électrons se fait de l'atome O du phénol vers l'atome de carbone lié au chlore.
d. La réaction est sélective puisque le groupe carboxyle de l'acide chloroacétique n'est pas modifié.

Protection et déprotection (§ 2 du cours)

14. Exploiter des informations
1. La molécule de 3-nitroacétophénone possède deux groupes caractéristiques, les deux sont transformés.
2. a. La transformation ❷ est sélective ; elle permet la protection du groupe carbonyle.
b. La transformation ❹ est appelée déprotection.
c. Les transformations ❷, ❸ et ❹ sont toutes des transformations sélectives ; parmi les deux groupes caractéristiques de la molécule, un seul est transformé.

Application à la synthèse peptidique (§3 du cours)

15. Reconnaître le squelette d'un acide α-aminé
a. Les acides aminés permettant de former le néotame ont les formules topologiques suivantes :

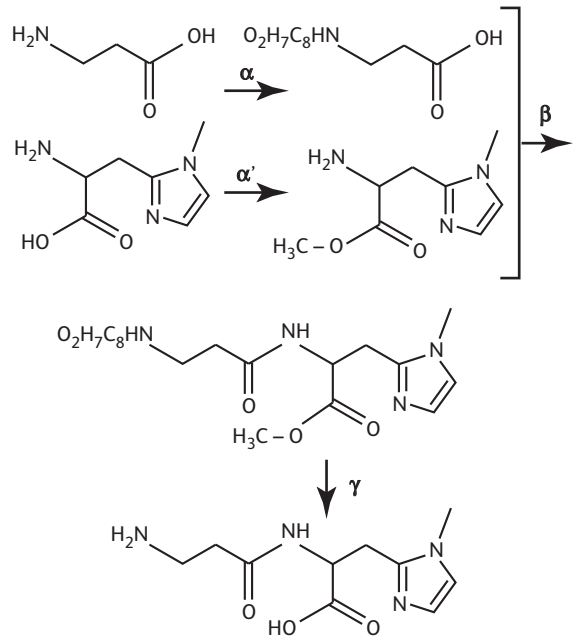


b. Pour obtenir le néotame, il est donc nécessaire de protéger le groupe caractéristique carboxyle de aa2 de la chaîne latérale (le plus éloigné de l'atome d'azote) et le groupe NH-*R* de aa2.

EXERCICES S'entraîner

16. Exercice résolu dans le manuel

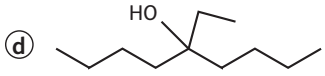
17. Application de l'exercice résolu
1. En identifiant les structures qui se conservent au cours de la réaction, on constate qu'il faut protéger le groupe amino de la β-alanine et le groupe carboxyle de la 3-méthylhistidine.
2.



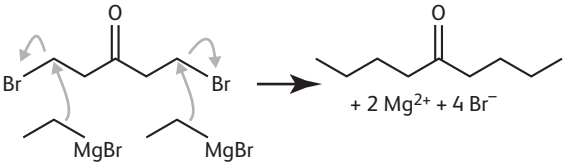
18. Exercice résolu dans le manuel

19. Application de l'exercice résolu

1.



2.

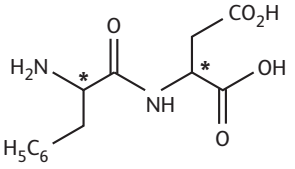


Pour atteindre l'objectif visé (former ⓒ sans former ⓓ), il est nécessaire de protéger le groupe carbonyle avant de faire réagir le bromure d'éthylmagnésium. La dernière étape de la synthèse consistera à déprotéger le groupe carbonyle.

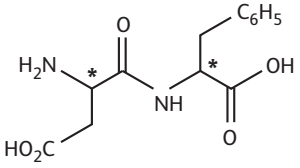
20. In English Please

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser.**

a. Phe-Asp :



Asp-Phe :



b. Chacun des acides aminés possède un carbone asymétrique, le carbone lié au groupe amino.

c. Chacun des dipeptides possède donc deux carbones asymétriques ; ceux marqués d'une étoile sur les schémas ci-dessus.

d. Le texte ne précise pas la configuration de la molécule possédant un pouvoir sucrant élevé, l'ambiguïté porte sur quatre diastéréoisomères.

21. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, communiquer.**

a. Le 4-oxopentanal est un composé bifonctionnel : son nom indique qu'il appartient à la classe fonctionnelle des cétones et à celle des aldéhydes.

D'après l'énoncé, sa réduction par $NaBH_4$ conduit à un diol, le pentan-1,4-diol.

b. La réaction transforme tous les groupes caractéristiques du réactif d'intérêt, elle n'est pas sélective.

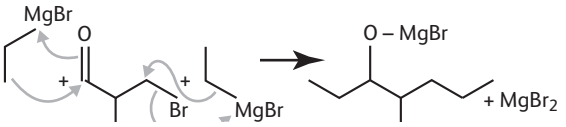
c. Le 4-hydroxypentanal appartient à la classe fonctionnelle des aldéhydes ; ainsi le groupe caractéristique carbonyle des aldéhydes n'a pas été transformé. En présence de $CeCl_3$, le tétrahydruroborate de sodium est un réactif sélectif.

d. Désormais, c'est le groupe caractéristique de la cétone qui ne doit pas être transformé. Il convient donc de le protéger avant la mise en présence du réducteur $NaBH_4$ avec le réactif d'intérêt.

22. S'auto-évaluer

a. La transformation *a* qui aboutit à **(3)** n'est pas sélective : l'atome de brome est substitué par un éthyle et le groupe carbonyle est également transformé.

b.

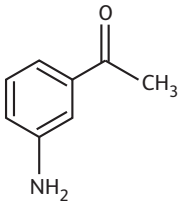


c. Pour obtenir la molécule **(4)** à partir de **(1)** et **(2)**, il faut tout d'abord protéger le groupe carbonyle (par exemple, en formant un acétal, voir activité 2), ajouter la molécule **(2)** puis déprotéger le groupe carboxyle.

23. Comparaison de réactifs inorganiques

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

a. La formule brute du produit obtenu permet de supposer que le groupe nitro a été réduit en groupe amino ; cette hypothèse est confirmée par la présence d'une bande forte vers 3 400 cm^{-1} que l'on peut attribuer aux liaisons N–H. Par ailleurs, la présence d'une bande fine et forte à 1669 cm^{-1} conduit à penser que la liaison C=O se retrouve dans le produit et n'a donc pas été réduite.

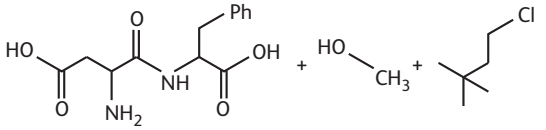


b. Dans l'exercice 14, on obtient le même produit mais en protégeant préalablement le groupe carbonyle. Ici, la transformation se fait en une seule étape.

24. ★ Stratégie de synthèse

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer.**

a.



A **B** **C**

b. Dans un premier temps, on protège le groupe carboxyle de **A**. Puis, on fait réagir ensemble **A** et **C**. Ensuite, on ajoute **B**.

Enfin, on déprotège le groupe carboxyle.

25. Protection sélective

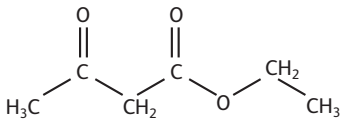
> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, valider.**

a. Réactifs : 3-oxobutanoate d'éthyle et éthane-1,2-diol.

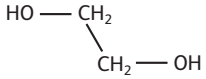
Catalyseur : acide paratoluènesulfonique APTS.

Solvant : cyclohexane.

b. 3-oxobutanoate d'éthyle :



éthane-1,2-diol :



c. L'énoncé indique que l'expérience doit permettre de protéger le groupe carbonyle du 3-oxobutanoate d'éthyle, on forme donc le produit **(3)**.
d. On peut vérifier en spectroscopie IR que la bande d'absorption due à C=O a disparu.

26. ★ Enzymes et sélectivité

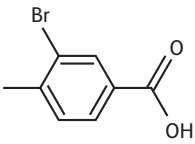
> COMPÉTENCES : **Analyser, communiquer.**

Dans cette synthèse de documents, les élèves doivent mentionner les points suivants :
1. Haute sélectivité des enzymes : une enzyme est généralement associée à une transformation et à un substrat donnés. Cette propriété permet de limiter les étapes de protection/déprotection, toujours coûteuses en réactifs, n'apparaissant pas dans le produit final et donc contraires aux principes de la chimie durable.
2. Capacité des enzymes à travailler dans des **conditions douces** (pas de haute température) : cette seconde propriété permet de limiter la consommation énergétique nécessaire à la fabrication de matériaux.
3. Capacité des enzymes à travailler dans l'**eau** : cette troisième propriété permet une alternative à l'utilisation de solvants polluants.
4. Capacité des enzymes à décomposer des **matières végétales** : cette dernière propriété permet de limiter l'utilisation de ressources fossiles comme matière première.

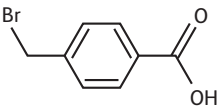
27. ★ Bromation

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

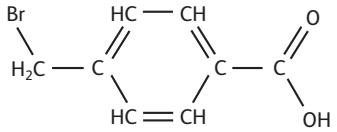
a. B a pour formule brute : $C_8H_7O_2Br$.
b. Substitution de l'atome d'hydrogène appartenant au cycle carboné :



Substitution de l'atome d'hydrogène appartenant au groupe méthyle :



c. Les données de RMN font apparaître deux doublets pour des déplacements chimiques de 7,05 ppm et 7,92 ppm. Ces signaux correspondent à 4 protons.
On peut faire l'hypothèse que ce sont les protons du cycle carboné.
L'atome de brome se serait alors substitué à l'atome d'hydrogène appartenant au groupe méthyle ; ceci est confirmé par le singulet à 4,28 ppm associé à deux protons, ceux situés sur le même carbone que Br.
La formule semi-développée de **B** est donc :

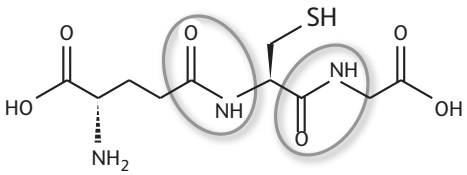


d. La transformation est sélective.

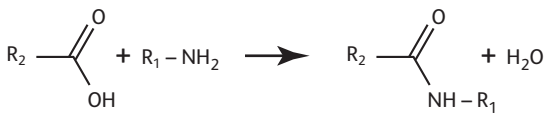
28. ★ Rétrosynthèse

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

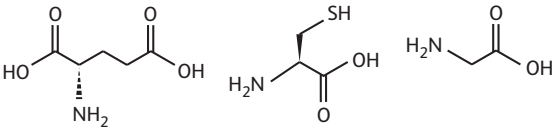
a.



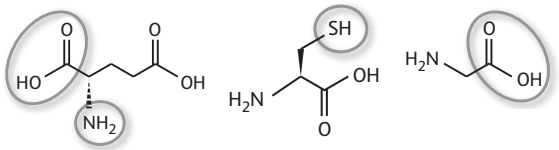
b.



Lors de cette réaction, il se forme une molécule d'eau.
c. Le glutathion est formé des trois acides aminés suivants :



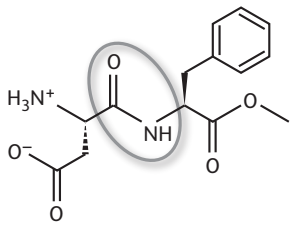
d. Les groupes ci-dessous ne doivent pas être transformés :



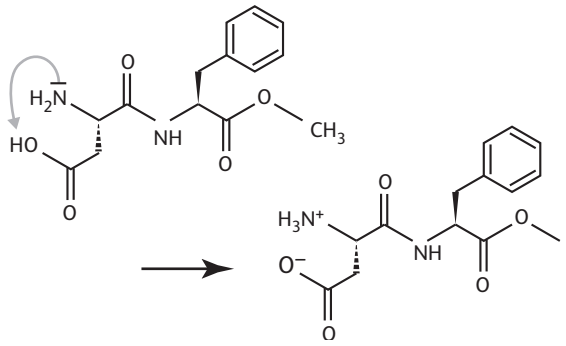
29. ★★ Synthèse peptidique

> COMPÉTENCES : **Analyser, communiquer.**

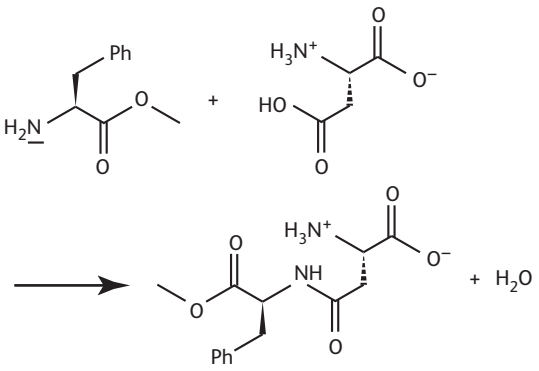
a.



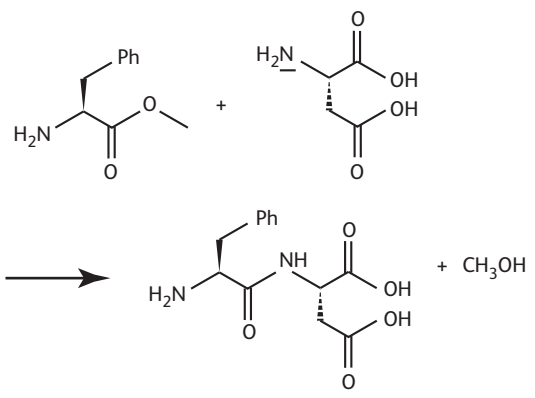
b.



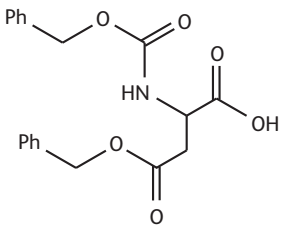
c. En l'absence de protection du groupe carboxyle **(2)**, la transformation suivante pourrait avoir lieu :



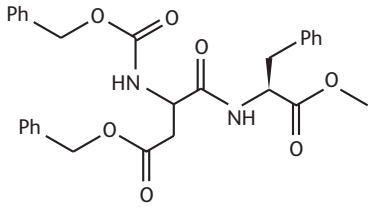
d. En l'absence de protection du groupe amino de l'acide aspartique, la transformation suivante pourrait avoir lieu :



e. Acide aspartique protégé :



Dipeptide totalement protégé :



f. Si la protection du groupe amino consiste à le transformer en groupe caractéristique des amides, alors, lors de la déprotection, on risque de transformer la liaison peptidique nouvellement créée.

g. Si la protection du groupe carboxyle consiste à le transformer en groupe caractéristique des esters, alors, lors de la déprotection, on risque de déprotéger également l'ester de la phénylalanine qui doit rester intact dans l'aspartame.

h. Lors d'une synthèse organique, il est courant que les réactifs utilisés soient des espèces polyfonctionnelles. Il faut donc envisager une voire plusieurs étapes de protection puis de déprotection de certains des groupes caractéristiques de ces molécules.

Pour choisir les groupes protecteurs les plus adaptés à la synthèse, il faut s'interroger, non seulement sur l'efficacité de la protection, mais aussi sur celle de la déprotection.

Ainsi, le chimiste recherche des groupes protecteurs **sélectifs**, c'est-à-dire qui transforment les groupes à protéger sans modifier les autres groupes. Les réactions associées aux étapes de protection doivent également se faire avec le meilleur rendement possible.

D'autre part, les étapes de déprotection doivent bien évidemment régénérer le groupe protégé sans modifier le reste de la molécule. Elles doivent également se faire avec le **meilleur rendement** possible. Une stratégie de protection-déprotection très pertinente consiste à déprotéger plusieurs groupes protecteurs en une seule étape : on améliore ainsi considérablement le rendement global de la synthèse.

30. ★★ Différentes sélectivités

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

1. a. Le réactif d'intérêt possède deux groupes caractéristiques, hydroxyle et carboxyle ; les deux sont transformés donc la réaction **(1)** n'est pas sélective.

b. pour la même raison, le réactif $SOCl_2$ n'est pas sélectif.

2. a. Le réactif d'intérêt possède deux groupes caractéristiques, carbonyle et carboxyle ; le groupe carbonyle n'est pas transformé donc la réaction **(2)** est sélective.

b. Pour la même raison, le réactif $SOCl_2$ est sélectif.

c. Les réponses aux questions **1.** et **2.** semblent se contredire ; il faudrait donc préciser vis-à-vis de quels groupes caractéristiques le réactif est ou non sélectif.

3. Cette réaction est stéréosélective parce qu'elle ne peut pas avoir lieu avec le diastéréoisomère du réactif d'intérêt.

31. ★★ **Synthèse multi-étapes**

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser.**

Il faut par exemple réaliser les réactions suivantes :
– Protection de A
– Protection de B
– Transformation de C en C′
– Protection de C′
– Déprotection de B
– Transformation de B en B′
– Protection de B’
– Déprotection de A
– Transformation de A en A′
– Déprotection de B′
– Déprotection de C′

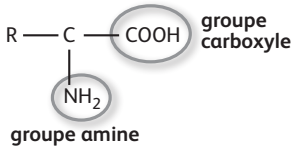
Soit 11 réactions. On peut envisager un autre ordre, mais le nombre de réactions reste inchangé.

EXERCICES Objectif BAC

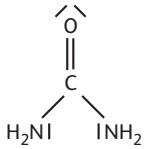
32. L'ORIGINE DES MOLÉCULES DU VIVANT

> COMPÉTENCES : **Connaître, analyser, réaliser communiquer.**

1. a. Un acide aminé est un composé bi-fonctionnel qui contient les groupes caractéristiques amine et carboxyle.
Le groupe carboxyle donne le nom « acide ».
Le groupe amine donne l'adjectif « aminé ».

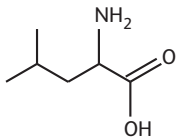


b. Les atomes d'oxygène et d'azote respectent la règle de l'octet.
L'atome d'oxygène partage deux doublets liants avec l'atome de carbone central, il est donc entouré de deux doublets non-liants.
L'atome d'azote partage 1 doublet liant avec l'atome de carbone et deux doublets liants avec les deux atomes d'hydrogène, il est donc entouré d'un doublet non-liant.



c. Le formaldéhyde se nomme officiellement méthanal.

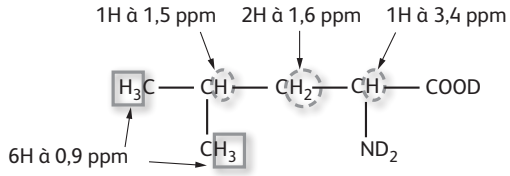
2. a. Formule topologique de la leucine :



b. La leucine et l'isoleucine possèdent la même formule brute mais des formules semi-développées différentes. Ce sont des isomères (de chaîne).

3. La spectroscopie de masse n'est pas adaptée : les deux molécules ont même masse molaire.
La spectroscopie IR n'est pas adaptée : les deux molécules possèdent les mêmes fonctions chimiques.
La spectroscopie de RMN est une bonne méthode. Elle fournit un spectre différent selon la structure de la molécule, en effet les atomes d'hydrogène apparaissent différemment selon leur environnement dans la molécule.

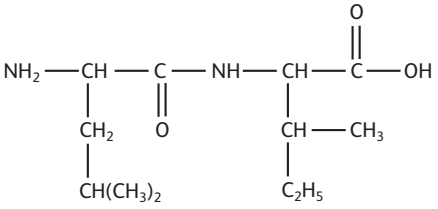
4. Le spectre de RMN de l'isoleucine comporterait 5 signaux et non pas 4.
• Un doublet intégrant pour 6 H, $\delta = 0{,}9$ ppm : 6 atomes d'hydrogène équivalents avec un seul H voisin.
• Un multiplet intégrant pour 1 H, $\delta = 1{,}5$ ppm : 1 atome d'hydrogène ayant de nombreux H voisins.
• Un triplet intégrant pour 2 H, $\delta = 1{,}6$ ppm : 2 atomes d'hydrogène équivalents ayant deux H voisins.
• Un triplet intégrant pour 1 H, $\delta = 3{,}4$ ppm : 1 atome d'hydrogène (différent des précédents) ayant deux H voisins. (Le déblindage est plus important à cause de la proximité des atomes électronégatifs O et de N.)
C'est le spectre de la leucine :



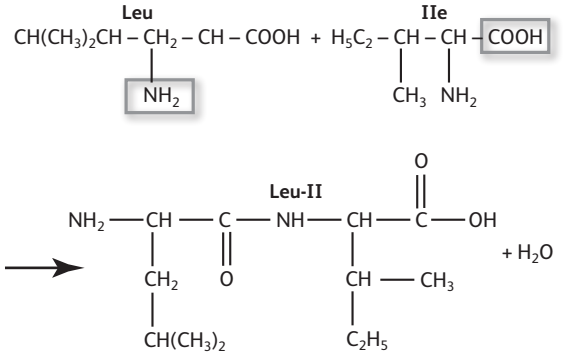
5. a. Lors de la formation d'un dipeptide, la fonction acide carboxylique d'une molécule d'acide aminé (Leu ou Ile) réagit avec la fonction amine d'une autre molécule d'acide aminé (Leu ou Ile).
Il y a donc $2^2 = 4$ possibilités :

$$N_{(Leu)} - CO_{(Leu)}$$
$$N_{(Leu)} - CO_{(Ile)}$$
$$N_{(Ile)} - CO_{(Leu)}$$
$$N_{(Ile)} - CO_{(Ile)}$$

Si on tient compte de l'énantiomérie, chacun des deux acides aminés possède deux énantiomères, il y a donc 4 acides aminés différents dans un mélange racémique et chacun peut réagir avec lui-même ou les trois autres. Dans ces conditions, il y a $2^4 = 16$ possibilités.



b. Pour faire réagir la fonction acide carboxylique de la leucine avec la fonction amine de l'isoleucine, il faut empêcher les réactions parasites en bloquant la fonction amine de la leucine et la fonction acide carboxylique de l'isoleucine.



6. La synthèse d'un seul dipeptide nécessite 3 étapes qu'il faut répéter pour chaque nouveau maillon de la chaîne de 50 acides aminés. La multiplication des étapes nécessite un **temps de synthèse très long**.
De plus elle diminue le rendement global.
(Chaque étape d'une synthèse s'effectue avec un rendement inférieur à 100 %.
En supposant un rendement identique à chaque opération et égal à x %, le rendement global de la synthèse est de x^3 % pour un dipeptide et *$x^{3(n-1)}$ %* pour un *n*-peptide.
Si $x = 0{,}98$ (ce qui est un excellent rendement), le rendement global pour un polypeptide de 50 acides aminés n'est plus que $0{,}98^{3\times49} = 5$ %.)

33. UN RÉACTIF CHIMIOSÉLECTIF : LE GLYCOL

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

1. La molécule ***a*** possède un groupe carbonyle et un groupe caractéristique d'un ester ; elle appartient à la classe fonctionnelle des cétones et des esters.

2. a. Lors de la première étape, l'éthane-1,2-diol réagit sélectivement avec le groupe carbonyle ; c'est un réactif chimiosélectif.

b. La première étape de la synthèse correspond à la protection de la fonction cétone ; cette protection permet d'éviter que le réactif de la deuxième étape ne transforme cette cétone ; on peut donc supposer que C_6H_5-MgBr réagit avec les cétones.

3. a. La molécule **e** possède un groupe caractéristique hydroxyle ; la bande d'absorption de la liaison O-H est caractéristique et permet d'envisager la spectroscopie I.R comme méthode d'analyse.

b. Le bécher contient une phase aqueuse et une phase organique.
Dans la phase aqueuse : de l'eau ; des ions bromure, magnésium et sulfate.
Dans la phase organique : de l'éther ; **d.**

c. D'après les données de l'énoncé, **e** est une espèce solide à température ambiante ; on peut envisager de purifier ce produit par recristallisation.

4. Lorsque les réactifs utilisés dans une synthèse organique sont des espèces polyfonctionnelles, il faut envisager des étapes de protection puis de déprotection de certains des groupes caractéristiques de ces molécules.

34. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

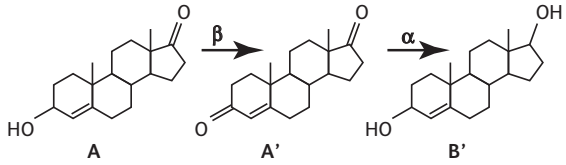
Synthèse de la testostérone

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

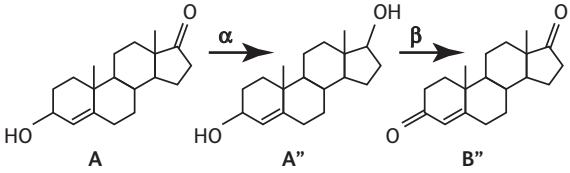
• Tout d'abord il est nécessaire d'identifier les modifications de chaînes et de groupes à effectuer pour obtenir **B** à partir de **A** :
– aucune modification de chaîne ;
– ***réduction*** du groupe carbonyle de **A** en groupe hydroxyle : notée transformation α ;
– ***oxydation*** du groupe hydroxyle de **A** en groupe carbonyle : notée transformation β.

• On identifie ensuite les réactifs possibles pour ces deux transformations ; d'après le document 2, la transformation β est réalisée grâce au tétrahydruroborate de sodium et la transformation α grâce au dichromate de pyridinium.

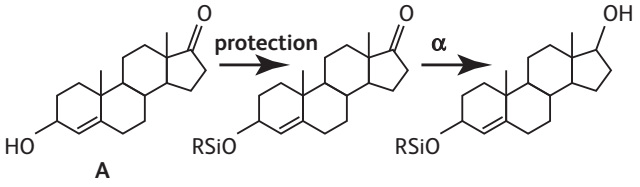
• Le document 3 évoquant des groupes protecteurs, il faut penser à la nécessité de protéger les groupes caractéristiques. En effet, après oxydation (transformation β), la molécule **A** conduit à **A**′ qui possède deux groupes carbonyles correspondant à des cétones et pouvant être réduits en **B**′ par le tétrahydruroborate de sodium (transformation α) :



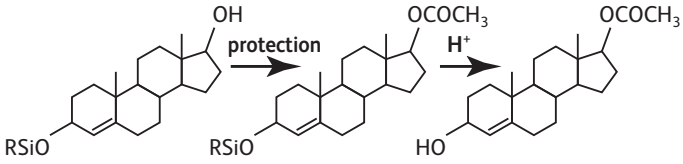
Si on envisage l'ordre inverse des transformations, on n'obtient toujours pas **B**. En effet, après réduction (transformation α), la molécule **A** conduit à **A**″ qui possède deux groupes hydroxyles pouvant être oxydés (transformation β) en groupe carbonyle **B**″ :

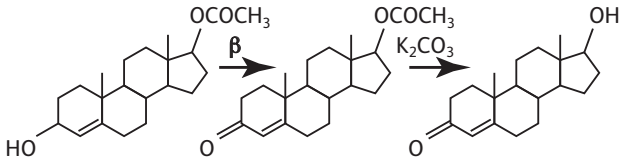


• Le document 3 donne des exemples de groupes protecteurs des alcools ; analysons ce qui les différencie :
– le premier groupe protecteur est insensible à l'oxydation ;
– le second groupe protecteur est insensible à la réduction.
On peut donc proposer la succession d'étapes suivantes :
1. Protection du groupe hydroxyle de **A** par $ClSi(CH_3)_3$, groupe insensible à la réduction.
2. Réduction du groupe carbonyle de **A**, transformation α : on obtient un groupe hydroxyle.
3. Protection du nouveau groupe hydroxyle par $CH_3-CO-O-CO-CH_3$, groupe insensible à l'oxydation.
4. Déprotection en milieu acide, on régénère le groupe hydroxyle de **A** ; l'autre protection est insensible au milieu acide.
5. Oxydation : transformation , le groupe hydroxyle de **A** est transformé en groupe carbonyle.
6. Déprotection en milieu basique, on régénère le groupe hydroxyle de **B**.


O
protection
O
α
OH
HO
RSiO
RSiO

A


OH
protection
OCOCH3
H+
OCOCH3
RSiO
RSiO
HO


OCOCH3
β
OCOCH3
K2CO3
OH
HO
O
O

B

CHAPITRE

24

AGIR

Transmettre et stocker de l'information

> Manuel pages 542 à 571

Choix pédagogiques

Ce chapitre traite les notions de toute la partie du programme « Transmettre et stocker de l'information ». La variété des notions abordées, ainsi que le faible nombre de connaissances se rapportant aux compétences exigibles, rendent ce chapitre atypique ; il a été choisi de le présenter sous forme de séquences. Chacune de ces séquences comportent une, deux ou trois activités, suivies d'un bilan. Elles correspondent aux cinq notions mises en évidence dans le programme, l'ordre étant respecté. Une sixième séquence, la séquence C « Étudier un phénomène optique » a été ajoutée ; elle ne comporte pas de bilan car il s'agit d'un prolongement de la séquence B sur les images numériques. Le professeur pourra choisir de la traiter en activités expérimentales des chapitres sur la diffraction et les interférences.

La plupart des conclusions reprises lors des bilans concernent des généralités qu'il est préférable de garder à l'esprit et non des connaissances qu'il est impératif de retenir. La disposition parfois utilisée d'une activité sur la page de gauche et du bilan sur la page de droite n'est donc pas gênante et peut même servir de guide à un élève en difficulté dans une activité.

OUVERTURE DE CHAPITRE

En quelques secondes, une photographie peut être transmise à l'autre bout du monde sous forme d'un signal parcourant des milieux différents.

Comment expliquer que le destinataire visualisera une image dont les pixels seront identiques à ceux de la photographie ?

L'évocation de la transmission d'une image par téléphone mobile permet d'aborder différentes notions du chapitre : image numérique, nature numérique du signal à transmettre, propagation du signal. L'accent est porté sur la possibilité donnée au destinataire d'obtenir une image rigoureusement identique à celle envoyée, même de très loin : cette idée que les signaux numériques permettent des transmissions fidèles sera l'une des notions importantes que l'élève devra comprendre dans le chapitre.

ACTIVITÉS

Séquence A. Transmission d'informations

1. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

Informations et chaînes de transmission

Commentaires

Les documents proposés illustrent des chaînes de transmission d'informations du quotidien et présentent certaines de leurs évolutions récentes.

L'exploitation de ces documents permet :
– de justifier l'utilisation de certaines chaînes de transmission pour certains usages ;
– d'exposer l'évolution récente des offres des fournisseurs d'accès à Internet.

Réponses

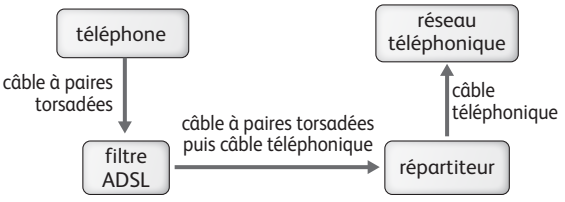
S'APPROPRIER

1. ①: voix ; ②: texte ; ③: données informatiques ; ④: vidéo et sons.

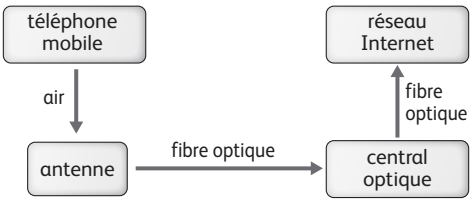
RÉALISER

2. En se limitant aux parties illustrées sur le document 1 :

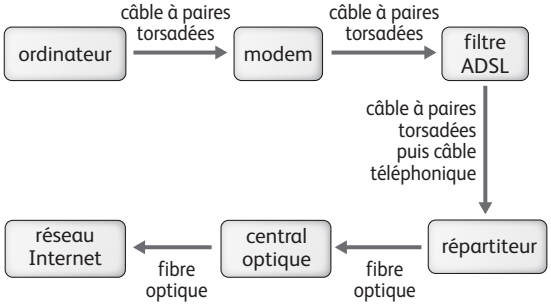
①



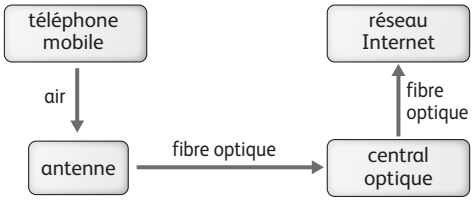
②



③



④



Remarque : d'autres chaînes sont parfois possibles ; en particulier les sens émetteurs/récepteurs peuvent parfois être inversés.

ANALYSER

3. Plusieurs choix sont possibles, par exemple :

① Le réseau de téléphonie classique, développé depuis les années 1970, relie la quasi-totalité des domiciles.

② La transmission libre des antennes relais permet la mobilité de l'usager.

③ Les délais de transmission courts de la technologie ADSL permettent le contrôle en « temps réel » du jeu vidéo.

④ La transmission par satellite est possible dans des «zones blanches» de la télévision par antennes relais, c'est-à-dire dans des zones trop éloignées des antennes relais ou mal situées pour permettre une bonne réception (présence d'obstacles ou d'interférences).

COMMUNIQUER

4. L'élève peut évoquer :

– L'augmentation des débits de connexion, favorisé par l'utilisation de la fibre optique au plus près de l'abonné. De nouveaux services sont ainsi disponibles en 2017 : TV par Internet par exemple.

– La convergence des technologies et des services, qui continuent à évoluer vers des standards et des matériels communs ou compatibles entre eux : convergence fixe-mobile, convergence entre l'audiovisuel et les communications électroniques, accessibles à l'aide d'équipements polyvalents.

– La mobilité permise à l'usager qui possède en 2017 une connexion accessible en divers endroits avec son téléphone mobile par exemple.

BILAN Transmission d'informations

Si aucune connaissance n'est exigible pour cette séquence, le bilan met en avant les généralités qui ressortent de l'activité : des informations de natures variées peuvent être échangées par l'intermédiaire d'un signal parcourant une chaîne de transmission comportant au moins un émetteur et un récepteur séparés par un milieu de propagation. Pour conclure, les trois principaux milieux de propagation sont évoqués : fibre optique, câble électrique et air. Ils interviendront également à la séquence E « Procédés physiques de transmission ».

Séquence B. Images numériques

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Codage d'une image numérique

Commentaires

L'utilisation d'un éditeur d'images comme *Gimp* doit permettre aux élèves de comprendre qu'une image numérique est pixellisée et de faire un lien entre l'image observée et le fichier source de l'image.

La manipulation d'un tel logiciel n'étant pas évidente, le document 4 en présente les fonctionnalités de base. Il aborde également la notion de codage d'un pixel qui fera l'objet des questions. Les notions de codage binaire et d'octet y sont évoquées : ces notions seront d'ailleurs utiles pour la suite du chapitre.

Le but de l'activité est de montrer que le fichier brut d'une image est composé d'une suite de nombres (d'octets) représentant les pixels de l'image et de déterminer le principe du codage RVB et du codage en niveaux de gris.

Pour cette activité, il est important de s'intéresser au fichier image brut (« raw ») car celui-ci ne contient que la succession des informations codant chacun des pixels. En pratique, un fichier brut n'est pas utilisable tel quel (on ne peut pas afficher une image à partir de son fichier raw, même avec *Gimp*, car il manque en particulier l'information du nombre de pixels en hauteur et largeur). Ainsi, une dernière question évoque le cas d'une image au format « bmp » (Windows bitmap) afin que l'élève s'interroge sur ce point. Pour l'activité, l'intérêt du format raw est de pouvoir lire le nombre d'octets d'un fichier se rapportant seulement au codage des pixels (les fichiers images habituels bmp, jpeg, etc., contiennent un en-tête précisant le format du fichier, la résolution de l'image, etc., auquel un certain nombre d'octets est alloué. De plus, la plupart des fichiers images, comme le format jpeg, utilisent un système de compression de l'information).

Remarques :

– Dans *Gimp*, pour enregistrer un fichier d'image brut, après « Enregistrer sous », choisir « Sélectionner le type de fichier » puis sélectionner « Données d'image raw ». Le fichier enregistré ne comporte alors pas d'extension.

– La taille du fichier peut être lue dans le logiciel *Gimp* (Image/Propriétés de l'image/Taille du fichier) ou par pointage du fichier dans le dossier le contenant (sur certains ordinateurs, il faudra, après un clic droit, afficher les propriétés du fichier).
– On peut utiliser un éditeur hexadécimal comme *Hexedit* afin de visualiser le code source d'un fichier. Les informations sont alors présentées sous forme hexadécimale (et un dernier octet 00 est systématiquement ajouté en fin de fichier avec *Hexedit*).

Réponses

RÉALISER

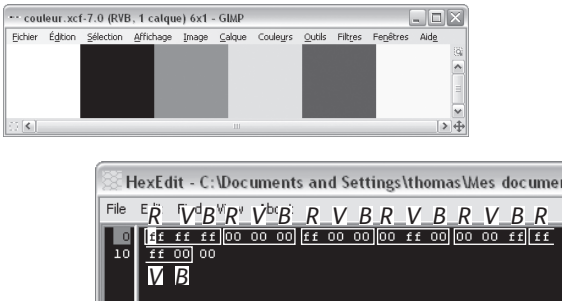
1. Suivre le protocole du document 2.

ANALYSER

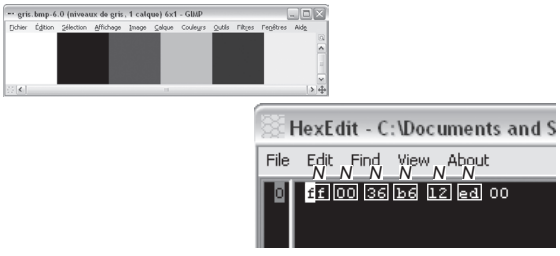
2. Le code correspond à la succession des trois composantes R, V et B de chacun des pixels :
« 255 255 255 / 000 000 000 / 255 000 000 / 000 255 000 / 000 000 255 / 255 255 000 », ou en hexadécimal : « FF FF FF / 00 00 00 / FF 00 00 / 00 FF 00 / 00 00 FF / FF FF 00 ».
La taille calculée est donc de $6 \times 3 = 18$ octets (3 octets par pixel).

VALIDER

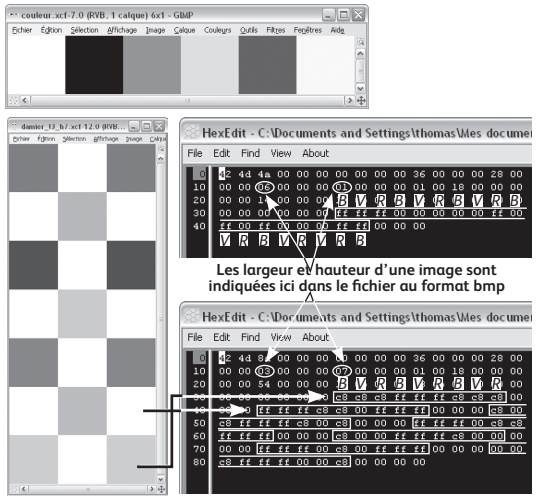
3. a. La taille du fichier image brut est bien de 18 octets.
Remarque : On peut vérifier le code du fichier image brut avec *Hexedit* par exemple (rappel : un dernier octet 00 est ajouté ici en fin de liste) :



b. La taille indiquée pour le fichier « gris » est de 6 octets. Les 6 pixels étant représentés par 6 octets, on en déduit qu'en niveaux de gris, un pixel est codé par un seul octet.
Remarques :
– Vérification avec *Hexedit* :



On peut montrer aux élèves, avec l'outil « Pipette à couleurs » que les composantes RVB indiquées par *Gimp* (ou un autre logiciel de dessin ou de traitement d'image) sont alors forcément identiques pour un même pixel : un seul nombre (variant de 0 à 255) code ainsi un pixel, donc un pixel est représenté par un octet.
– Il est intéressant de noter que le pixel vert est représenté par une nuance plus claire que les pixels rouge et bleu. Ceci est du à l'algorithme permettant le passage du mode RVB au mode niveaux de gris : il prend en compte la plus grande sensibilité de l'œil aux radiations vertes en affectant un poids plus important à la composante V.
c. Une image numérique est enregistrée sous la forme d'un fichier contenant une suite d'octets représentant chacun des pixels de l'image. Mais pour être utilisable, le fichier doit porter des informations supplémentaires. En particulier, la hauteur et la largeur de l'image doivent être connues pour afficher l'image sur un écran ou pour l'imprimer.
Remarques :
– En créant, à l'aide du logiciel *Gimp*, deux images de hauteurs et largeurs différentes enregistrées au format bmp, on peut identifier les positions, dans le fichier édité par *Hexedit*, des octets correspondant à ces données, comme illustré sur la figure ci-dessous.



– D'autres indications sont mentionnées dans l'entête du fichier, comme un code définissant le format de l'image précisé par les deux premiers octets (42 4D précisent le format bmp), comme la taille totale du fichier indiqué par les quatre octets suivants, etc. On notera que dans le format bmp, les octets des composantes RVB sont positionnés dans l'ordre B, V puis R, et que les octets représentant les lignes du bas de l'image sont indiqués en premier (voir figure ci-dessus).
– Les octets enregistrés détaillent chacun des pixels dans les cas des formats raw ou bmp par exemple. Mais la plupart des formats usuels d'images « compressent » les fichiers en ne détaillant pas forcément le code de tous les pixels de l'image. La perte de qualité résultante peut passer inaperçue pour certaines images si le format est bien choisi.

BILAN Images numériques

L'élève doit comprendre qu'une image numérique est pixellisée et que chacun des pixels est représenté dans le fichier source par un nombre d'octets dépendant du codage adopté. Les notions de bit et d'octet (utiles pour la suite du chapitre) sont reprécisées et utilisées dans le cas du codage RVB ou en niveaux de gris d'un pixel.

Séquence C. Étude d'un phénomène optique

3. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Étude d'une figure de diffraction

Cette séquence ne comporte pas de bilan et se présente comme une application des images numériques présentées à la séquence B.

Commentaires

L'analyse d'une image numérique est évoquée par un document montrant la possibilité de tracer une courbe de distribution de l'intensité lumineuse le long d'une ligne de pixels.

La figure de diffraction représentée est proche de celle qu'obtiendrait un élève dans une salle comportant un éclairage parasite (dû en particulier aux écrans d'ordinateurs) avec une webcam usuelle utilisée en mode automatique, la source étant une diode laser et l'écran placé à 1,5 m de la fente diffractante.

Le logiciel utilisé dans le document est *Regavi*, permettant d'exporter facilement des données vers un tableur-grapheur (*Regressi*) qui permet d'effectuer des mesures confortables, par exemple en utilisant deux curseurs affichant un écart entre deux abscisses. Cependant, on pourra choisir d'utiliser un autre logiciel d'analyse d'images, comme *SalsaJ* par exemple.

Il est ensuite demandé à l'élève de concevoir et de réaliser une manipulation utilisant ce moyen d'analyse afin d'effecteur une mesure de la largeur de la tache centrale d'une figure de diffraction.

Enfin, on amène l'élève à estimer l'incertitude de sa mesure et à imaginer une manière d'améliorer la précision du résultat.

Remarques :

– Il est possible d'utiliser une fonction du logiciel *Regavi* dite de « lissage » de l'intensité, qui a pour rôle de faire une moyenne des mesures sur plusieurs lignes de pixels au dessus et au dessous de la ligne de mesures choisie. Cela permet de réduire les effets du bruit (visible par la granularité de la photographie) sur la courbe de distribution de l'intensité. Dans le document, il a été utilisé un « lissage » de 3.

– De la même manière, avec le logiciel *SalsaJ*, on peut utiliser une sélection rectangulaire afin de sélectionner plusieurs lignes de pixels.

– Hormis les effets de la lumière parasite, la distribution en intensité de la figure de diffraction ne possède pas les valeurs d'intensité prévues par la théorie de la diffraction de Fraunhofer, sans doute à cause de la saturation de certains pixels dû à la luminosité importante dans la tache centrale et des réglages imposés par le logiciel pilotant la webcam.

– Il est possible d'utiliser un polariseur (deux si on utilise un laser non polarisé) pour réduire le phénomène de saturation. On peut ainsi envisager d'utiliser un laser hélium-néon au faisceau plus «propre» mais plus intense que celui d'une diode laser.

– Il est également possible de remplacer l'écran blanc par une feuille de papier calque pour placer la webcam en arrière et bien en face de la figure de diffraction.

– Vu la petite taille (quelques mm^2) des capteurs de webcam, la projection directe (après avoir retiré l'objectif de la webcam) de la figure de diffraction sur le capteur ne permet pas de se placer dans les conditions de Fraunhofer et la distribution en intensité s'écarte nettement de celle dont on a l'habitude.

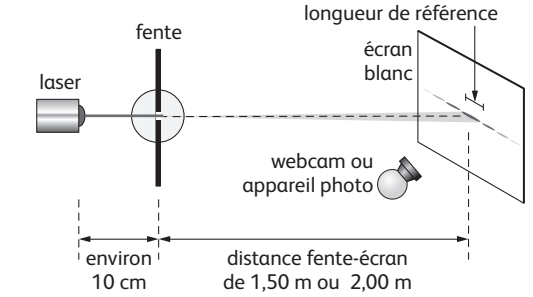
Réponses

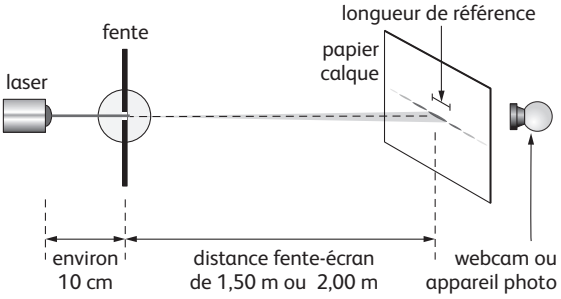
S'APPROPRIER

1. Les maxima d'intensité de la courbe correspondent aux zones les plus lumineuses de la photographie, et les minima d'intensité correspondent aux zones les plus sombres.

ANALYSER

2. Exemples de montages :





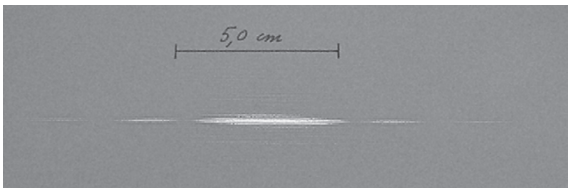
RÉALISER

3. a. Lors de la manipulation, on soignera les points suivants :

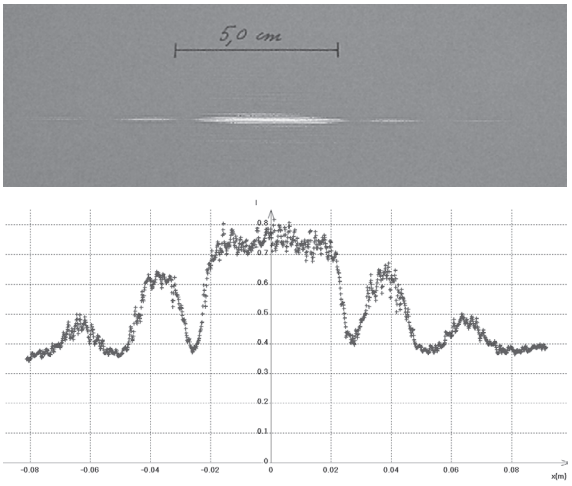
– faire attention aux alignements des éléments du montage, respecter une distance grande entre fente et écran ;

– ne pas oublier de tracer la longueur de référence sur l'écran pour déterminer l'échelle de l'image ;

– pour la capture, veiller au cadrage (figure de diffraction centrée, longueur de référence présente sur la photographie) et utiliser un grand champ (figure de diffraction pas trop petite sur la photographie).
Exemple d'image (fente de largeur 40 mm, distance fente-écran de 1,50 m, présence de lumière parasite due principalement aux écrans d'ordinateurs) :

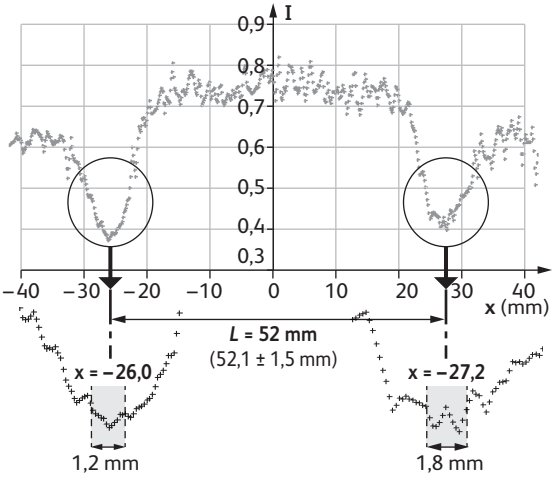


b. Pour tracer la courbe de distribution de l'intensité lumineuse, il faut utiliser la longueur de référence en précisant, sous *Regavi* ou *SalsaJ*, la valeur qui lui est associée.
On obtient par exemple, en utilisant *Regavi* puis *Regressi* :



Remarque :
Pour l'exploitation du logiciel d'analyse d'images, on pourra fournir aux élèves une notice simplifiée du ou des logiciels disponibles sur le site Internet compagnon Sirius.
c. La largeur L correspond à la distance séparant les deux premiers minima d'intensité. Dans le cas précédent, on mesure $L = 52{,}1$ mm.
Remarques :
– on s'intéresse aux minima d'intensité car ils se repèrent sur la courbe de manière plus précise que les maxima d'intensité ;
– pour une mesure correcte, il est nécessaire d'utiliser la fonction zoom ;
– on peut utiliser le pointage à deux curseurs de *Regressi* par exemple afin d'obtenir directement l'écart entre les abscisses des deux minima d'intensité.

VALIDER
4. a. Ici, ce n'est pas la taille associée à un pixel (distance entre deux points consécutifs de la courbe) qui limite la précision de la mesure, mais plutôt l'appréciation de la position des minima, comme le montre la figure ci-dessous : dans ce cas, on peut estimer que le premier minima est apprécié à 0,6 mm près et le deuxième à 0,9 mm près, d'où une incertitude $U(L) = 0{,}6 + 0{,}9 = 1{,}5$ mm.



Remarques :
– Si l'image enregistrée par la webcam possède une résolution petite, alors l'appréciation sur écran d'un minima d'intensité se fait au pixel près et dans ce cas, c'est la taille associée au pixel qui limite la précision de la mesure.
– L'utilisation de la fonction « lissage » du logiciel *Regavi* ou la sélection rectangulaire de *SalsaJ* peuvent avoir un effet sur l'estimation de l'incertitude.
b. Pour réaliser une mesure L' plus précise de la largeur de la tache centrale, on peut mesurer la largeur L_n séparant les $n^{\text{ièmes}}$ extinctions de part et d'autre de la tache centrale. Ainsi $L_n = n \times L'$, soit $L' = \dfrac{L_n}{n}$ puisque chaque tache secondaire compte pour une demi tache centrale.

L'incertitude relative plus petite dans ce cas conduit à une estimation plus précise de la largeur de la tache centrale. Remarque : Pour plus de précision, voir le tableau en haut de page suivante.

Tableau de la question 4.b. de l'activité 3 :

Mesures	Mesure directe de la largeur de la tache centrale	Mesure indirecte en passant par la distance entre les $n^{ièmes}$ minima	
			Détermination de la largeur de la tache centrale
Grandeur	L	L_n	$L' = \frac{L_n}{n}$
Incertitude absolue	$U(L)$	$U(L_n)$	$U(L') = U(L_n)$
	Pour une incertitude absolue $U(L_n)$ identique à celle de la mesure directe, on a : $U(L') = U(L_n) = U(L)$		
Incertitude relative	$\frac{U(L)}{L}$	$\frac{U(L_n)}{L_n} < \frac{U(L)}{L}$	$\frac{U(L')}{L'} = \frac{U(L_n)}{L_n} = \frac{U(L)}{n \times L'}$
Conclusion	D'après la dernière expression, on a : $U(L') = \frac{U(L)}{n}$; donc l'incertitude sur la mesure de la largeur de la tache centrale est d'autant plus petite dans le cas de la mesure indirecte que le nombre n considéré est grand.		

4. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Interférences en lumière blanche

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

Séquence D. Signal analogique et signal numérique

5. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Analogique ou numérique ?

Commentaires
Cette activité introduit les notions de signal analogique et de signal numérique et propose de différencier la nature de signaux issus de l'enregistrement d'un son. Bien que les signaux numériques soient aujourd'hui bien plus utilisés en télécommunication que les signaux analogiques, il est remarqué qu'un signal numérique est moins riche en informations qu'un signal analogique dont il peut être issu. Enfin, l'élève est invité à réfléchir à un des intérêts des signaux numériques : leur plus grande immunité face au bruit lors d'une transmission.
Remarque : Le document 2, illustrant l'allure d'un signal bruité au cours de sa transmission, montre qu'un signal numérique n'est pas forcément un signal dont la grandeur associée ne prendrait que des valeurs discrètes parfaitement déterminées, contrairement à l'information qu'il transmet (information binaire pour cet exemple, ne prenant que les valeurs 0 ou 1).

Réponses
S'APPROPRIER
1. La grandeur que l'on souhaite analyser est un son. La grandeur observée sur l'oscilloscope est une tension.

ANALYSER
2. a. Il s'agit d'un signal analogique car les informations traduisant le son sont associées à la valeur de la tension qui varie ici de manière continue.
b. Le signal transmis par la carte d'acquisition est numérique car l'information sonore est traduite par des valeurs discrètes associées aux valeurs de la tension.
c. Un signal numérique n'est pas identique au signal analogique auquel il correspond : il contient moins d'informations que ce dernier.

S'APPROPRIER
3. L'information binaire transmise est 101101.
La tension du signal numérique bruité ne possède pas des valeurs discrètes précises comme celle du signal numérique à transmettre (mais l'information associée prend bien des valeurs discrètes 0 ou 1).

VALIDER
4. On peut ici facilement retrouver l'information numérique contenue dans le signal transmis en considérant que les valeurs binaires 0 et 1 sont respectivement associées aux valeurs de tensions supérieures et inférieures à 1 V par exemple.
Dans le cas de l'exemple proposé, si l'amplitude du bruit est supérieure à 1 V, l'information transmise sera erronée.
De manière générale, on peut retrouver l'information numérique à transmettre si le rapport de l'amplitude du signal par l'amplitude du bruit n'est pas trop petit.

6. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Numérisation d'un signal sonore

Commentaires
Une étude graphique permet d'étudier la quantification d'un signal numérisé avant de réaliser une étude

expérimentale de l'échantillonnage d'une tension sinusoïdale. On invite enfin l'élève à mettre en pratique les conclusions obtenues sur les paramètres d'une acquisition en effectuant la numérisation d'un son, l'exemple choisi étant assez simple (son émis par un diapason) pour prévoir les réglages pertinents.
Remarque : il a été choisi de réaliser une étude préalable sur la quantification sous forme documentaire du fait de la difficulté de sa mise en évidence avec certains logiciels d'acquisition.

Réponses

S'APPROPRIER

1. a. Le document 1 précise que la carte d'acquisition a une résolution de 4 bits. Quatre chiffres binaires sont nécessaires pour représenter l'information du signal numérisé, donc la carte d'acquisition a bien une résolution de 4 bits.
b. Le pas indiqué par le document est $p = 0{,}27$ V.

ANALYSER

2. a. Si le nombre de bits du CAN est plus grand, alors il y a davantage de valeurs autorisées pour le signal numérisé, donc l'écart entre deux valeurs de la tension, c'est-à-dire le pas, diminue.
La conversion est alors plus précise car la tension numérisée a une allure plus proche de la tension analogique considérée.
b. La conversion est plus précise pour un calibre petit car le pas p est alors plus petit.

RÉALISER

3. a. Suivre le protocole du document 2.
b. Les signaux numérisés avec une période d'échantillonnage T_e de 1, 2 et 5 ms ont une allure proche du signal analogique, mais pas les signaux numérisés avec $T_e = 10$ ms (allure triangulaire) ou $T_e = 20$ ms (tension à peu près constante).
Le signal numérisé est plus ressemblant au signal analogique pour $T_e = 1$ ms, c'est-à-dire pour la période d'échantillonnage la plus petite, donc pour la fréquence d'échantillonnage la plus grande.

ANALYSER

4. a. Pour effectuer la meilleure numérisation, il faut que le signal numérisé soit le plus ressemblant au signal analogique, et donc que la fréquence d'échantillonnage f_e soit la plus élevée : davantage d'échantillons du signal analogique sont mesurés pour une même durée.
b. Le signal numérisé est plus ressemblant au signal analogique pour une fréquence d'échantillonnage élevée, mais cela impose de ne pas dépasser une certaine durée totale pour l'enregistrement puisque le nombre de points de mesures est limité.

RÉALISER

5. Pour obtenir la meilleure quantification, le nombre de bits de la carte d'acquisition n'étant pas modifiable, on choisit un calibre tel que l'amplitude du signal affiché sur écran soit la plus grande.
On pourra par exemple choisir le calibre [-500 mV ; + 500 mV] souvent adapté au signal délivré par un microphone.
Pour obtenir un échantillonnage satisfaisant, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit suffisamment grande devant celle du son pur étudié ici.
Cela suppose de faire un compromis entre la fréquence d'échantillonnage et la durée totale de l'acquisition. Pour que la durée totale d'acquisition soit suffisamment longue, on peut choisir un nombre maximum de points de mesures (limité par le système d'acquisition), et estimer que l'échantillonnage est correct s'il y a par exemple au moins 20 mesures réalisées par période du son étudié, et choisir ainsi : $f_e = 20 \times f_{son}$.
On pourra par exemple choisir $f_e = 10$ kHz (pour un diapason à 440 Hz, on a $20 \times f_{son} = 8{,}8$ kHz), et un nombre de points de mesure de 4000. Ainsi, la durée totale de l'acquisition sera fixée à $\Delta t = 4\,000 \times T_e$, avec :

$$T_e = \frac{1}{f_e} = \frac{1}{10 \times 10^3} = 1{,}0 \times 10^{-4}\ \text{s} = 0{,}10\ \text{ms},$$

donc on aura $\Delta t = 0{,}40$ s.

BILAN Signal analogique et signal numérique

Dans une première page, le bilan définit et différencie les natures analogique et numérique des signaux et conclut sur les principaux avantages des signaux numériques.
Remarque : un exemple où l'information d'un signal numérique est associée à des variations de fréquence d'une tension montre qu'un signal numérique peut être représenté par une grandeur dont la valeur varie de façon continue.
Dans une seconde page, la numérisation est définit comme résultant d'un échantillonnage et d'une quantification d'un signal analogique. Les paramètres affectant la qualité d'une numérisation sont précisés et leurs effets sont illustrés par des graphiques.

Séquence E. Procédés physiques de transmission

7. DÉMARCHE D'INVESTIGATION
Propagation libre ou guidée d'un signal

Pour cette démarche d'investigation, se reporter aux fiches-guides élève et professeur sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

8. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Étude de différents supports de transmission

Commentaires

Des documents permettent de comparer les principaux supports de transmission en évoquant en particulier

l'atténuation du signal lors de sa propagation et le débit d'information d'une transmission. On conclut en s'interrogeant sur des situations de dessertes des communications Internet.
Remarque : l'exercice de synthèse de documents 36 page 566 présente les différentes situations de desserte du réseau Internet.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Le débit binaire peut s'exprimer en bit.s^{-1}. Les fibres optiques monomodes permettent les meilleurs débits de transmission.

RÉALISER

2. L'atténuation indiquée de 0,2 dB pour une propagation de 1 km dans la fibre optique monomode conduit à une atténuation de 20 dB pour 100 km. Avec cette atténuation, 1 % de l'énergie émise est toujours présente. Ainsi, la distance maximale de transmission par la fibre présentée est de 100 km avec l'hypothèse indiquée.
Dans le cas de la ligne téléphonique avec ADSL, on a une atténuation de 15 dB pour 1 km, d'où une atténuation de 20 dB pour 1,3 km qui correspond à la distance maximale de la transmission par câble téléphonique.

ANALYSER

3. a. Les débits des communications sont bien meilleurs lorsque des fibres optiques sont installées jusqu'au domicile de l'abonné. L'atténuation des signaux transmis est également plus petite.
Les offres « fibres » (ou FTTH pour « Fiber To The Home ») restent onéreuses car il faut compléter le réseau de fibres optiques et les fournisseurs d'accès ne proposent parfois pas ces offres dans les zones pas assez densément peuplées pour des raisons économiques.
b. Lorsqu'un abonné est situé loin du répartiteur téléphonique le plus proche, la longueur de la ligne ne permet pas d'obtenir le débit nécessaire pour la télévision par ADSL (documents 1 et 2). Les communications par satellite permettent quant à elles d'obtenir les débits nécessaires dans ces « zones blanches » de la technologie ADSL.
c. La téléphonie par Internet n'est généralement pas transmise par satellite à cause des délais de transmission relativement élevés dans ce cas (document 1), et qui sont contraignants pour les conversations.

9. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE
Propagation guidée d'un signal

Commentaires

L'étude d'un signal réfléchi en bout de câble coaxial permet de mettre en évidence l'atténuation dans le cas d'une propagation guidée et de déterminer le coefficient d'atténuation du câble pour le signal considéré. L'élève est ensuite invité à s'interroger sur des propagations sur de plus longues distances.
Remarque : il n'a pas été choisi dans ce chapitre de faire déterminer la vitesse de propagation du signal dans le câble, mais il est possible de le demander à un élève de terminale.
Les débuts des signaux émis et réfléchi sont séparés de 1,0 division, soit d'une durée $\Delta t = 1{,}0$ ms.
Pendant la durée Δt, le signal réfléchi a parcouru deux fois la longueur du câble (écho), donc :

$$v = \frac{2L}{\Delta t}$$

A. N. : $v = \dfrac{2 \times 100}{1{,}0 \times 10^{-6}} = 2{,}0 \times 10^{8}$ m·s^{-1}.

On a donc : $v = 0{,}66 \times c$, qui correspond à la vitesse de la lumière dans un milieu d'indice $n = 1{,}5$ (plastique présent entre le cœur et l'âme du câble).

Réponses

RÉALISER

1. a. Suivre le protocole décrit par la question et par le document 1.
b. Mesure des amplitudes :

$$U_e = 1{,}3 \times 2 = 2{,}6 \text{ V} ; U_s = 1{,}1 \times 2 = 2{,}2 \text{ V}.$$

Calcul du coefficient d'atténuation du câble pour le signal étudié :

$$\alpha = \frac{1}{2L} \times 20 \log \frac{U_E}{U_R}$$

A. N. : $\alpha = \dfrac{1}{2 \times 100} \times 20 \log \dfrac{2{,}6}{2{,}2} = 7{,}3 \times 10^{-3}$ dB·m^{-1}.

Remarque : cette valeur est éloignée de celle habituellement indiquée par les fabricants de câbles coaxiaux car elle est donnée pour des signaux de fréquences de l'ordre de 800 MHz (atténuation de 17 ou 19 dB pour 100 m, soit un coefficient d'atténuation de 0,17 ou 0,19 dB·m^{-1}).

ANALYSER

2. a. Le signal réfléchi possède une amplitude plus petite que celle du signal émis à cause du phénomène d'affaiblissement du signal au cours de sa transmission.
b. On observe également que la forme des impulsions est modifiée (phénomène de dispersion).
Remarque : on peut aussi évoquer le décalage des deux signaux dû à l'aller-retour dans le câble pour le signal réfléchi.

RÉALISER

3. À adapter au matériel disponible.

VALIDER

4. L'atténuation reste faible pour une propagation d'une centaine de mètres dans un câble coaxial. Pour une propagation sur 10 km, l'atténuation que subit le signal est 100 fois plus grande et peut devenir trop importante si le signal transmis n'est plus correctement détecté. En pratique, on peut utiliser des répéteurs afin de régénérer le signal au cours de sa propagation.

BILAN Procédés physiques de transmission

La propagation libre d'un signal est différenciée de la propagation guidée. Le débit d'information ainsi que l'atténuation subie par un signal sont présentés comme deux qualités essentielles d'une transmission. La distinction est faite entre l'atténuation du signal au cours d'une transmission et le coefficient d'atténuation.
Remarque : la comparaison des propagations dans des fibres multimode et monomode est évoquée dans l'exercice 37 page 567.

Séquence F. Stockage optique

10. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
Disque optique et données numériques

Commentaires

Le principe de lecture des données d'un CD est présenté par des documents. Il est demandé à l'élève de faire le lien avec le phénomène d'interférence.
Remarque : la limitation imposée par le phénomène de diffraction n'est pas évoquée dans cette activité.

Réponses

S'APPROPRIER

1. Un rayon atteignant le fond d'un creux parcourt une longueur supplémentaire correspondant à deux fois (aller-retour) la profondeur du creux, c'est-à-dire à une demi longueur d'onde de la radiation dans le polycarbonate d'après le document 1 $\left(2 \times \frac{\lambda_{poly}}{4} = \frac{\lambda_{poly}}{2}\right)$.

ANALYSER

2. Après réflexion sur la zone réfléchissante, deux rayons issus du faisceau laser peuvent se superposer et interférer (le laser est une source de lumière cohérente). On peut distinguer plusieurs cas pour le spot représenté :
– si les deux rayons se réfléchissent sur le plat autour de l'alvéole, la différence de marche est nulle, les interférences sont constructives et l'intensité lumineuse résultante est non nulle ;
– il en est de même si les deux rayons se réfléchissent au fond du creux ;
– par contre, pour un rayon se réfléchissant sur le plat et l'autre au fond du creux, la différence de marche vaut $\frac{\lambda_{poly}}{2}$, donc les interférences sont destructives.
Puisque certains rayons interfèrent de manière destructive lorsque le spot se situe sur une alvéole, alors l'intensité lumineuse du faisceau réfléchi est minimale.

COMMUNIQUER

3. Au cours de la lecture, le faisceau laser parcourt le sillon et conduit, après réflexion, à une intensité lumineuse détectée :
– maximale lorsque le spot se trouve sur un plat entre deux alvéoles car tous les rayons se réfléchissant restent en phase ;
– minimale lorsque le spot se trouve sur une alvéole car deux rayons se réfléchissant d'une part sur un plat et d'autre part au fond du creux créent des interférences destructives.

BILAN Stockage optique

Le principe de lecture d'un disque optique est interprété en terme d'interférences possibles entre rayons du faisceau laser de lecture. La capacité de stockage sur disque optique et son évolution sont présentés en s'appuyant le phénomène de diffraction. Une explication rapide du codage sur disque optique est évoquée, ainsi que le principe de l'écriture sur disque inscriptible.

EXERCICES Appliquer le cours

Transmission d'informations (séquence A)

14. Identifier une chaîne de transmission

Dispositif	Téléphone mobile	Téléphone « pot de yaourt »
Type de signal	ondes électromagnétiques	ondes mécaniques
Milieu de propagation	air (puis câbles en cuivre ou de fibres optiques des réseaux de communication)	fil
Émetteur	antenne du téléphone	fond du pot de yaourt
Récepteur	antenne du téléphone	fond du pot de yaourt

Images numériques (séquence B)

15. Associer un tableau de nombres à une image

a. Ce pixel est bleu (composante R et V d'intensité nulle et B d'intensité maximale).
b. Ce pixel est jaune (superposition d'une lumière rouge et d'une lumière verte d'intensité identique).
c. Le cyan est obtenu par superposition d'une lumière verte et bleue dans des proportions identiques, donc un pixel cyan a pour code RVB : « 0 ; 255 ; 255 ».
d. En niveau de gris, un pixel blanc est associé à la valeur la plus grande d'un octet : « 255 ».

Signal analogique et signal numérique (séquence D)

16. Reconnaître des signaux

a. Un signal analogique transmet une information représentée par une infinité de valeurs (sous la forme de variations continues d'une grandeur), alors qu'un

signal numérique transmet une information associée à un nombre fini de valeurs déterminées.
b. Pour le signal ⓐ, la tension, donc l'information transmise, ne prend que deux valeurs différentes. Il s'agit donc d'un signal numérique. Pour le signal ⓑ, la tension prend une infinité de valeurs différentes. Il s'agit donc d'un signal analogique.

Procédés physiques de transmission (séquence E)

17. Étudier la numérisation d'un signal
a. Ces signaux sont numériques car ils sont représentés par un nombre fini de valeurs déterminées.
b. Le pas p d'une conversion correspond au plus petit écart de tension possible entre deux points de mesure. Dans les deux cas, $p = 0{,}05$ V.
c. Dans le premier cas, la période d'échantillonnage vaut $T_e = 1$ ms, donc la fréquence d'échantillonnage vaut :

$f_e = \dfrac{1}{T_e} = \dfrac{1}{10^{-3}} = 10^3$ Hz soit $f_e = 1$ kHz.

Dans le deuxième cas, $f_e = 2$ kHz.
d. La numérisation est la plus fidèle dans le second cas car davantage de points de mesure sont enregistrés pour une même durée d'acquisition (de manière générale, une acquisition est d'autant plus fidèle que le pas est petit et que la fréquence d'échantillonnage est grande).

18. Caractériser une transmission numérique
30 images de 5,0 ko doivent être transmisses en une seconde, donc le débit binaire nécessaire à la connexion est de $30 \times 5{,}0 = 1{,}5 \times 10^2$ ko·s^{-1}.
Remarque : on peut exprimer ce débit en bit·s^{-1} en considérant que 1 octet représente 8 bits :
$1{,}5 \times 10^2$ ko·s^{-1} = $1{,}5 \times 10^5$ octet·s^{-1}
= $8 \times 1{,}5 \times 10^5$ bit·s^{-1} = $1{,}2 \times 10^6$ bit·s^{-1} (= 1,2 Mbit·s^{-1}).

19. Évaluer l'affaiblissement d'un signal
L'affaiblissement en puissance est tel que :

$\alpha = \dfrac{1}{\ell} \times 10 \log \dfrac{P_E}{P_S}$;

donc $\log \dfrac{P_E}{P_S} = \dfrac{\alpha \ell}{10} = \dfrac{0{,}20 \times 50}{10} = 1{,}0$ dB.

Ainsi $\dfrac{P_E}{P_S} = 10$.

Le signal est dix fois moins puissant en sortie qu'en entrée de câble.

Stockage optique (séquence F)

20. Expliquer la lecture d'un disque optique
a. Dans le cas où le spot laser est situé sur une alvéole :
– des rayons du faisceau laser se réfléchissent sur un plat et d'autres sur un creux ;
– ces deux types de rayons sont en oppositions de phase lorsqu'ils se réfléchissent ;
– le signal détecté est minimum (interférences destructives entre certains rayons du faisceau).
b. Dans le cas où le spot laser n'est pas situé sur une alvéole :
– les rayons du faisceau laser se réfléchissent tous sur un plat ;
– tous les rayons réfléchis sont en phase ;
– le signal détecté est maximum (interférences constructives entre tous les rayons).

EXERCICES S'entraîner

21. Exercice résolu dans le manuel

22. Application de l'exercice résolu
1. Une image au format HD comporte :
$1\,280 \times 720 = 921\,600$ pixels.
En supposant que le codage RVB est utilisé, chaque pixel est représenté par 3 octets, donc l'image a une taille de $921\,600 \times 3 = 2\,764\,800$ octets.
Or, 1 Mo = 10^3 ko = 10^6 octets, donc la taille de l'image vaut $\dfrac{2\,764\,800}{10^6} = 2{,}76$ Mo.
2. Puisque 1 octet correspond à 8 bits, la taille d'une image vaut $2{,}76 \times 8 = 22{,}1$ Mbit.
Avec un débit de 300 Mbit·s^{-1}, on peut afficher en une seconde au maximum : $\dfrac{300}{22{,}1} = 13{,}6$; soit 13 images.
3. D'après le résultat précédent, on ne pourrait pas afficher assez d'images pour que la vidéo paraisse fluide, ce qui contredit notre quotidien. Le raisonnement est erroné car on n'a pas pris en compte la possibilité de compresser la vidéo.

23. Exercice résolu dans le manuel

24. Application de l'exercice résolu
1. Le pas de la conversion s'exprime : $p = \dfrac{\Delta U}{N}$.
L'intervalle de mesures vaut ici : $\Delta U = 2{,}0$ V.
La résolution de la carte d'acquisition valant $n = 8$ bits, le nombre le plus grand que peut fournir la carte est le nombre binaire 11111111, de valeur décimale $N = 255$.
Ainsi, on a : $p = \dfrac{2{,}0}{255} = 0{,}0078$ V.
2. La numérisation étant la plus fidèle possible, la fréquence d'échantillonnage doit être la plus grande possible et vaut ici : $f_e = 1{,}0$ MHz.
La période d'échantillonnage T_e associée représente la durée séparant deux mesures. Cette durée est donc :

$T_e = \dfrac{1}{f_e}$; A. N. : $T_e = \dfrac{1}{1{,}0 \times 10^6} = 1{,}0 \times 10^{-6}$ s.

Or, la période du signal à numériser est :

$T = \dfrac{1}{f}$; A. N. : $T = \dfrac{1}{500} = 2{,}0 \times 10^{-3}$ s.

Il y a ainsi $\frac{T}{T_e} = \frac{2{,}0 \times 10^{-3}}{1{,}0 \times 10^{-6}} = 2{,}0 \times 10^3$ points de mesures par période du signal à numériser. L'échantillonnage est donc correct ici.

3. À chaque mesure, l'ordinateur enregistre un nombre binaire de 8 bits, c'est-à-dire un octet. À la fréquence d'échantillonnage choisie, 1,0 millions de mesures sont effectuées en une seconde. Pendant la durée $\Delta t = 100$ ms le nombre de mesures est dix fois moindre. Il y a donc $1{,}0 \times 10^5$ octets enregistrés.

25. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : **Analyser, réaliser, communiquer**.

a. D'après les données, un caractère est codé par un octet. Le SMS comportant 35 caractères, il y a transmission de 35 octets.

Le débit binaire correspond au nombre de bit ou octets transmis en une seconde, donc le débit de cette transmission est de $\frac{35}{1{,}23} = 28{,}5$ octet·s^{-1}.

b. D'après les données, le codage RVB est utilisé ici, donc trois octets sont nécessaires pour représenter un pixel. L'image comportant $320 \times 240 = 76800$ pixels est donc décrite par $3 \times 76\,800 = 230\,400$ octets.

Pour la valeur du débit estimée précédemment, la durée de la transmission vaut :

$$\frac{230\,400}{28{,}5} = 8{,}08 \times 10^3 \text{ s} = 135 \text{ min} = 2{,}25 \text{ h}.$$

Ce résultat n'est pas cohérent avec notre quotidien, puisque l'envoi d'une image classique, comme ici, ne dure que quelques secondes. L'évaluation du débit de la transmission à la question précédente est faussée par la durée d'initialisation plus grande que la durée de la transmission des données. Il faudrait connaître précisément cette durée d'initialisation pour établir une valeur significative du débit, qui serait bien plus importante que celle établie à la réponse précédente.

26. Communication en champ proche

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer**.

D'après les caractéristiques du tableau, la technologie NFC a l'avantage, vis-à-vis du service de paiement sans contact :

– d'être de courte portée (quelques centimètres) afin que le paiement s'effectue de manière volontaire par approche du téléphone mobile vers le lecteur et que la transmission des données bancaires soit sécurisée (pas d'interception des données, bien qu'elles soient transmises dans l'air en propagation libre) ;

– de nécessiter une durée courte (inférieure à 0,1 s) pour établir la connexion pour que le paiement soit rapide.

Le débit de la communication, limité dans le cas de la communication en champ proche, n'est pas restrictif pour un paiement car l'échange de données bancaires ne fait pas intervenir beaucoup de données.

27. Coefficient d'atténuation d'une ligne

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser**.

a. Par mesure sur les graphiques : $U_e = 4{,}0$ V et $U_s = 2{,}0$ V ; d'où $\frac{U_e}{U_s} = 2{,}0$; donc le signal subit un affaiblissement en amplitude d'un facteur deux.

b. Si les puissances sont proportionnelles aux carrés des amplitudes, alors :

$$\log \frac{P_e}{P_s} = \log\left(\frac{U_e}{U_s}\right)^2 = 2 \log\left(\frac{U_e}{U_s}\right)$$

Or, $\alpha = \frac{1}{\ell} \times 10 \log \frac{P_e}{P_s}$;

donc $\alpha = \frac{1}{\ell} \times 20 \log \frac{U_e}{U_s}$.

A. N. : $\alpha = \frac{1}{16} \times 20 \log(2{,}0) = 0{,}38$ dB·m^{-1}.

28. Choix d'un échantillonnage

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. La fréquence d'échantillonnage doit être maximale pour que la numérisation soit la plus fidèle possible.

b. La fréquence d'échantillonnage f_e est maximale lorsque les $N = 1000$ échantillons possibles sont réalisés. Pour l'enregistrement de durée Δt, cela revient à ce que la durée entre deux mesures soit :

$\frac{\Delta t}{N} = \frac{0{,}040}{1\,000} = 4{,}0 \times 10^{-5}$ s. Cette durée correspond à la période d'échantillonnage T_e la plus courte possible, donc la fréquence d'échantillonnage maximale vaut :

$$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{4{,}0 \times 10^{-5}} = 2{,}5 \times 10^4 \text{ Hz}.$$

c. Ici $f_e > 20f$, donc l'échantillonnage est satisfaisant.

29. Taille d'une photographie numérique

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. L'indication « 12 Mpixels » fait référence au nombre de pixels composant les photographies enregistrées par l'appareil, comme le montre la dimension « 4000 × 3000 » correspondant aux nombres de pixels en largeur et hauteur.

En codage RVB, un pixel est décrit par trois octets.

Ainsi, $12 \times 10^6 \times 3 = 3{,}6 \times 10^7$ octets codent une photographie.

Puisque 1 Mo = 10^6 octets, la conversion du nombre précédent donne :

$$3{,}6 \times 10^7 \text{ octets} = \frac{3{,}6 \times 10^7}{10^6} \text{ Mo} = 36 \text{ Mo}.$$

b. La taille indiquée dans les propriétés du fichier image est bien plus petite puisqu'elle vaut 3,06 Mo. L'hypothèse selon laquelle les pixels de la photographie sont enregistrés en utilisant le code RVB est donc fausse.

En effet, l'image numérique est enregistrée au format JPEG, dont le but est de fournir un fichier compressé

n'attribuant pas un code de trois octets à chaque pixel de l'image, sans que la qualité d'une photographie habituelle ne soit beaucoup affectée.

30. In English Please

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser.**

a. La voix est un signal analogique car elle transmet des informations sous la forme de variations continues de l'intensité sonore (l'information qu'elle contient est associée à une infinité de valeurs).
Elle est convertie en signal numérique au cours d'une communication VoIP, car l'information est alors associée à un nombre fini de valeurs binaires.
b. Les deux paramètres essentiels de la modulation d'impulsion codée sont la fréquence d'échantillonnage et la résolution (nombre de bits) du convertisseur.
Pour l'exemple illustré :
– la fréquence d'échantillonnage vaut :

$$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{23 \times 10^{-6}} = 4{,}3 \times 10^4 \text{ Hz};$$

– il y $16 = 2^4$ valeurs différentes possibles pour l'amplitude, donc le convertisseur a une résolution de 4 bits.

31. ★ Transmission dans un câble

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. Il s'agit d'un signal numérique car il transmet une information associée à un nombre fini de valeurs discrètes (0 ou 1).
b. Le débit binaire correspond au nombre de bits transférés en une seconde. Or, un nombre $N = 1$ bit est transmis pendant la durée $\Delta t = 10$ ms. Le débit vaut donc :

$$D = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{10 \times 10^{-6}} = 1{,}0 \times 10^5 \text{ bit·s}^{-1}.$$

c. La baisse d'amplitude s'explique par l'affaiblissement du signal : une part de l'énergie émise est dissipée.

d. $\alpha = \frac{1}{\ell} \times 10 \log \frac{P_E}{P_S}$; donc $\log \frac{P_E}{P_S} = \frac{\alpha \ell}{10}$;

ainsi, $\frac{P_E}{P_S} = 10^{\frac{\alpha \ell}{10}} = 10^{0{,}15 \times \frac{40}{10}} = 4{,}0.$

La puissance du signal en sortie de câble est quatre fois plus petite qu'en entrée.

32. ★ Lecture de l'information d'un CD

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser.**

a. La longueur d'onde à considérer est celle du rayonnement laser dans le polycarbonate, soit :

$$\lambda_{poly} = \frac{\lambda_0}{n_{poly}}.$$

A. N. : $\lambda_{poly} = \frac{780}{1{,}55} = 503$ nm.

b. Lorsque le spot atteint une alvéole, une partie du faisceau se réfléchit au fond du creux tandis que les parties latérales du faisceau se réfléchissent sur les plats adjacents à l'alvéole. Un rayon se réfléchissant au fond du creux parcourt donc un chemin optique plus long qu'un rayon se réfléchissant sur une zone plate.
La différence de marche, du fait de l'aller-retour, vaut : $\delta = 2e = 2 \times 125 = 250$ nm ;

donc $\delta \approx \frac{\lambda_{poly}}{2}$.

Ainsi, ces deux rayons se retrouvent après réflexion en situation d'interférences destructives. L'ensemble de la lumière réfléchie possède donc ici une intensité minimale lorsqu'elle atteint le capteur car certains rayons sont en opposition de phase après réflexion.

33. ★ Évolution des disques optiques

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, valider.**

a. La réduction de la taille des alvéoles permet d'en disposer davantage sur un disque de même surface et donc d'enregistrer plus d'informations.
b. Le faisceau doit être davantage focalisé car le principe de lecture (basé sur les interférences entre les rayons réfléchis) impose au faisceau laser de recouvrir un peu plus qu'une alvéole, sans chevaucher les autres alvéoles.
c. Afin d'augmenter la capacité des disques, il faut disposer d'un plus grand nombre d'alvéoles en diminuant leur taille. Il faut donc diminuer également la taille du spot, en réduisant l'écart angulaire θ dû au phénomène de diffraction. Or le phénomène de diffraction est d'autant plus sensible que la dimension de l'objet diffractant (le système de focalisation) est petite devant la longueur d'onde du rayonnement. Une solution possible est donc de diminuer la longueur d'onde du faisceau laser utilisé, comme cela est indiqué par le document :

$$\lambda_{Blu\text{-}Ray} < \lambda_{DVD} < \lambda_{CD}.$$

34. ★★ La technologie Blu-ray

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider.**

a. La technologie Blu-ray utilise un laser de lecture de petite longueur d'onde par rapport aux technologies CD et DVD, afin de réduire l'effet de la diffraction sur la taille du spot laser. Ce dernier n'est pas aussi étalé et permet la lecture de données enregistrées par des alvéoles plus petites : ceci augmente la capacité de stockage du disque.
b. Émetteur : lecteur Blu-ray ; récepteur : télévision ; support de propagation : câble HDMI.
c. La résolution est de 16 bits sur deux voix, donc il y a $2 \times 16 = 32$ bits de données pour chaque échantillon enregistré. D'après la fréquence d'échantillonnage utilisé pour l'enregistrement, il y a en une seconde $44{,}1 \times 10^3$ échantillons qui sont transférés, donc le débit de la transmission audio est de :
$32 \times 44{,}1 \times 10^3 = 1{,}41 \times 10^6$ bit·s^{-1} = 1,41 Mbit·s^{-1}.
d. Dans l'hypothèse du codage RVB, trois octets sont nécessaires à la détermination d'un pixel, donc une image est décrite par :
$3 \times 1\,920 \times 1\,080 = 6\,220\,800$ octets.
e. D'après la fréquence d'affichage du téléviseur, 60 images sont traitées en une seconde, donc le débit de la transmission vidéo est de :
$60 \times 6\,220\,800 = 3{,}7 \times 10^8$ octet·s^{-1}.

Un octet correspondant à 8 bits, le débit se ramène à :
$8 \times 3{,}7 \times 10^8 = 3{,}0 \times 10^9$ bit·s^{-1} = 3,0 Gbit·s^{-1}.
Ce débit est plus de mille fois supérieur à celui lié à la transmission du signal audio.
f. Si on ne considère que le signal vidéo, la capacité totale du disque permet une durée d'enregistrement de :
$\frac{50 \times 10^9}{3{,}7 \times 10^8} = 1{,}4 \times 10^2$ s, soit à peine plus de deux minutes.
Ce résultat n'est pas satisfaisant car on n'a pas pris en compte la compression des données vidéo, alors décrites par un nombre plus faible d'octets sans modifier sensiblement la qualité de la vidéo. La durée totale d'enregistrement est ainsi bien plus grande en pratique.

35. ★★ S'auto-évaluer

a. Le signal transmis par la tête de la parabole est numérique car l'information qu'il transmet est associé à deux valeurs de la phase (valeur positive ou négative) auxquelles correspondent deux valeurs binaires représentant l'information.

b. $\alpha = \frac{1}{\ell} \times 10 \log \frac{P_E}{P_S}$; donc $\frac{P_E}{P_S} = 10^{\frac{\alpha \ell}{10}}$;

d'où $P_S = P_E \times 10^{-\frac{\alpha \ell}{10}}$.

Ici, le signal possède une fréquence de 2400 MHz, donc l'atténuation de la transmission vaut 38,8 dB pour une longueur de câble de 100 m, d'après les indications du fabricant. Dans ces conditions, le coefficient d'atténuation du câble vaut : $\alpha = \frac{38{,}8}{100} = 0{,}388$ dB·m^{-1}.
Or, la longueur du câble vaut $\ell = 25$ m d'après les indications du fabricant.
Ainsi, $P_S = 2{,}0 \times 10^{-0{,}388 \times \frac{25}{10}} = 0{,}21$ mW.

36. Offres « Internet »

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, communiquer.**

Exemple d'éléments que l'on peut retrouver dans la synthèse :

a. *Introduction possible*
Les offres des fournisseurs d'accès à Internet répondent à des situations variées et doivent prendre en compte les multiples besoins de la population et les différentes configurations des territoires.

b. *Différents besoins des usagers*
Les besoins diffèrent d'un usager à l'autre et selon la situation dans laquelle il se trouve. Certains usagers ont besoin :
– d'un débit très élevé (en particulier pour les usages multimédia) ;
– de temps de réponse courts (applications interactives comme les jeux vidéo en ligne) ;
– d'une connexion permanente (mobilité de la téléphonie mobile par exemple) ;
– de débits symétriques (pour le télétravail par exemple).
D'autres privilégient le coût de l'abonnement.

c. *Distinction entre les niveaux de transport, collecte et desserte*
Le réseau Internet est structuré en trois niveaux aux besoins différents :
– le réseau de transport (au niveau international et national) doit supporter des débits énormes et utilise uniquement la fibre optique comme milieu de propagation des signaux, car celle-ci permet les meilleurs débits et des atténuations des signaux acceptables sur de longues distances ;
– le réseau de collecte (au niveau de la région et du département) utilise de la même manière la fibre optique, parfois le réseau téléphonique avec les technologies DSL moins performantes (débits moyens et portée limitée à cause d'une atténuation bien plus importante) mais nécessitant moins d'investissement, et les technologies sans fil (faisceaux hertziens, liaison satellite, etc.) permettent un accès géographiquement plus large sans nécessité de réaliser beaucoup d'infrastructures ;
– le réseau de desserte (au niveau des villes et des quartiers) nécessite des débits plus limités, mais il doit atteindre un maximum d'abonnés et utilise ainsi divers supports et technologies de transmission selon la configuration des territoires.

d. Configuration du territoire et desserte des communications :
Les technologies utilisées en desserte sont en grande partie déterminées par la configuration du territoire :
– les secteurs urbains et denses permettent l'emploi de technologies performantes mais souvent à fort investissement (fibres optiques jusqu'au domicile, ADSL2+, 3G, WiMAX, etc.) ;
– les secteurs isolés et peu denses imposent d'autres technologies moins performantes du fait de l'atténuation importante pour les grandes distances de transmission (ADSL au lieu de ADSL2+, ReADSL, etc.) mais nécessitant des investissement moins conséquents (ADSL ou ReADSL en propagation guidée, WiMAX ou Wi-Fi en propagation libre, etc.) ;
– les secteurs avec peu d'obstacles et des points hauts se prêtent bien aux réseaux hertziens (WiMAX, Wi-Fi, etc.) ;
– les infrastructures présentes (réseau téléphonique, réseau optique déjà présent, etc.) permettent de réduire les coûts de mise en œuvre de certaines technologies en évitant des travaux lourds.

e. Complémentarité des technologies de desserte :
Les technologies au niveau de la desserte peuvent se compléter :
– dans les zones peu denses, la desserte haut débit par les réseaux filaires n'est pas toujours assurée, on parle de « zones blanches ADSL », car la zone de desserte de l'ADSL est limitée à quelques kilomètres autour du répartiteur téléphonique et que le niveau de service est conditionné par la distance entre l'abonné et le répartiteur, à cause du phénomène d'affaiblissement. Dans ce cas, le Wi-Fi ou le WiMAX par exemple sont des solutions possibles, car bien adaptées à la couverture rapide de zones où la clientèle est dispersée. La desserte par

satellite est également possible car elle couvre de très grandes étendues, mais offres des performances plus limitées ;
– contrairement à l'ADSL, l'offre SDSL autorise les débits symétriques généralement utiles aux entreprises mais pas aux particuliers.
Les technologies de desserte peuvent aussi se concurrencer selon les usages possibles, les performances et les coûts ;
– dans une zone urbaine, un opérateur peut proposer de l'ADSL (peu coûteux, débit moyen) tandis qu'un autre offre du FttH (plus coûteux, débit élevé) ; chaque abonné choisit la technologie qui répond le mieux à ses besoins ;
– sur un même territoire, une technologie sans fil (WiMAX, WiFi, etc.) permet aux usagers de se connecter en déplacement mais aussi à leur domicile, tandis qu'une technologie filaire (DSL, fibre au domicile) offre des accès uniquement résidentiels mais généralement plus performants.
f. Conclusion possible :
Du fait des situations variées selon les besoins et les contextes géographiques, aucune technologie n'offre de solution universelle à la desserte des communications Internet. Les fournisseurs d'accès à Internet font appel à une association de technologies complémentaires, chacune avec ses avantages et ses inconvénients en termes de performances (débit, temps de réponse), de portée (liée à l'atténuation des signaux transmis et fonction des débits désirés), de coûts, de caractéristiques techniques (propagation libre ou guidée, mobilité, symétrie, facilité de mise en œuvre, etc.).

EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site :
sirius.nathan.fr/sirius2017

37. DISPERSION DANS UNE FIBRE OPTIQUE

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider**.

1. Le document 2 montre que le signal transmet une information binaire, représentée soit par la présence, soit par l'absence d'impulsion pendant une durée T. Un bit 1 ou 0 est ainsi transmis à chaque durée T écoulée, donc le débit binaire de ce signal vaut :

$$D = \frac{1}{T}$$

2. Deux impulsions doivent être au moins séparées par la durée correspondant à son élargissement en sortie de fibre optique (doc. 3) :

$$T = \Delta t = \frac{L \times n_1}{c} \times \left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right).$$

$$\text{A. N. : } \Delta t = \frac{1{,}0 \times 10^3 \times 1{,}456}{3{,}0 \times 10^8} \times \left(\frac{1{,}456}{1{,}410} - 1\right) = 1{,}6 \times 10^{-7} \text{ s.}$$

Dans ce cas le débit binaire maximal vaut :

$$D = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{1{,}6 \times 10^{-7}} = 6{,}3 \times 10^6 \text{ bit·s}^1 = 6{,}3 \text{ Mbit·s}^{-1}.$$

3. Le cœur d'une fibre monomode est plus petit que pour une fibre à saut d'indice, donc la différence de parcourt entre deux rayons est plus petite que pour une fibre à saut d'indice. Ainsi, la dispersion est moindre, c'est-à-dire que Δt est plus petit, donc le débit de transmission permis pour que deux impulsions en entrée de fibre ne se superposent pas en sortie est plus important.

38. TRANSMISSION D'INFORMATIONS PAR FIBRE OPTIQUE

> COMPÉTENCES : **S'approprier, analyser, réaliser, valider**.

1. L'utilisation d'un laser est en particulier justifié par :
– la directivité de son faisceau qui permet de concentrer davantage la lumière en entrée de fibre optique ;
– sa puissance élevée pour que l'affaiblissement au cours de la transmission n'empêche pas de percevoir le signal en sortie de fibre.
2. Le choix de la longueur d'onde du rayonnement est motivé par une atténuation du signal la plus faible, donc un coefficient d'atténuation le plus petit. Ainsi, la longueur que l'on peut retenir est $\ell = 1{,}3$ µm (1 300 nm), ce qui correspond à un laser du domaine de l'infrarouge.
3. a. En notant N la taille du fichier, et D le débit binaire de la transmission, la durée Δt du transfert s'exprime :

$$D = \frac{N}{\Delta t} ;$$

D'où $\Delta t = \frac{N}{D}$.

A.N. : $D = 100 \text{ Mbit·s}^{-1} = 100 \times 10^6 \text{ bit·s}^{-1}$;
$N = 50 \text{ Mio} = 50 \times 2^{20} \text{ octets} = 50 \times 2^{20} \times 8 \text{ bits}$;

$$\text{donc } \Delta t = \frac{50 \times 2^{20} \times 8}{100 \times 10^6} = 4{,}19 \text{ s.}$$

b. Le nombre de pixels d'une image est :
$600 \times 450 = 270\,000$ pixels.
Avec un codage de 24 bits par pixels, la taille d'une image vaut : $270\,000 \times 24 = 6\,480\,000$ bit = 6,48 Mbit.
Le débit nécessaire à la transmission de la vidéo affichant 25 images par seconde est donc de :
$6{,}48 \times 25 = 162 \text{ Mbit·s}^{-1}$.
Ce débit est supérieur au débit moyen disponible donc la transmission ne peut pas être assurée dans de bonnes conditions, dans l'hypothèse du codage RVB (la possibilité de compresser les images de la vidéo lors de l'enregistrement et lors de la transmission de l'information n'a pas été prise en compte).
4. • *Méthode 1 : détermination de la longueur l maximale pour une transmission satisfaisante*
Pour une puissance P_{sortie} égale à 1 % de la valeur de $P_{\text{entrée}}$, on a $\frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} = 0{,}01$.

Donc $\frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie}}} = 100$.

L'atténuation correspondante s'exprime :

$A_{dB} = \alpha\ell = 10 \log \frac{P_{entrée}}{P_{sortie}}$, donc la longueur ℓ de la transmission vaut :

$$\ell = \frac{A_{dB}}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \times 10 \log \frac{P_{entrée}}{P_{sortie}}$$

avec α le coefficient d'atténuation déterminé par lecture graphique du document 2 : pour un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 850$ nm $= 0{,}85$ µm, on a $\alpha = 2{,}5$ dB·km^{-1}.

A. N. : $\ell = \frac{1}{2{,}5} \times 10 \log(100) = 8{,}0$ km.

Cette longueur est plus petite que la longueur $L = 10{,}0$ km, donc les clients situés en périphérie de ville ne bénéficient pas de signaux satisfaisants.

• *Méthode 2 : détermination de la part de puissance transmise pour la longueur L = 10,0 km*

Pour une transmission de longueur L, on a :

$A_{dB} = \alpha \cdot L = 10 \log \frac{P_{entrée}}{P_{sortie}}$

donc $\log \frac{P_{entrée}}{P_{sortie}} = \frac{\alpha \cdot L}{10}$

ainsi $\frac{P_{entrée}}{P_{sortie}} = 10^{\frac{\alpha \cdot L}{10}}$

ainsi $\frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} = 10^{-\frac{\alpha \cdot L}{10}}$

avec α le coefficient d'atténuation déterminé par lecture graphique du document 2 : pour un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 850$ nm $= 0{,}85$ µm, on a $\alpha = 2{,}5$ dB·km^{-1}.

A. N. : $\frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} = 10^{\frac{2{,}5 \times 10}{10}} = 3{,}2 \times 10^{-3} = 0{,}32$ %.

Pour la longueur L, la puissance du signal en sortie est inférieure à 1 % de la puissance du signal en entrée, donc tous les clients ne bénéficient pas de signaux satisfaisants.

• *Méthode 3 : détermination de A_{dB} et utilisation de la proportionnalité*

Pour une puissance P_{sortie} égale à 1 % de la valeur de $P_{entrée}$, on a :

$$\frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} = 0{,}01.$$

Donc $\frac{P_{entrée}}{P_{sortie}} = 100$.

L'atténuation correspondante vaut :

$$A_{dB} = 10 \log \frac{P_{entrée}}{P_{sortie}}.$$

A. N. : $A_{dB} = 10 \times \log(100) = 20$ dB.

Par ailleurs, le coefficient d'atténuation α se détermine par lecture graphique du document 2 : pour un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 850$ nm $= 0{,}85$ µm, on a $\alpha = 2{,}5$ dB·km^{-1}.

Longueur parcourue par le signal (km)	Atténuation (dB)
$\ell = 1$ km	$A_1 = 2{,}5$ dB
$L = ?$ km	$A_{dB} = 20$ dB

Par proportionnalité :

$$L = \frac{A_{dB} \times \ell}{A_1} = \frac{20 \times 1}{2{,}5} = 8{,}0 \text{ km}.$$

Cette longueur est plus petite que la longueur $L = 10{,}0$ km, donc les clients situés en périphérie de ville ne bénéficient pas de signaux satisfaisants.

39. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Communication d'un drone

> COMPÉTENCES : **S'approprier, connaître, analyser, réaliser, valider, communiquer**.

Exemple de réponse :

• **Faut-il considérer le phénomène de diffraction ?**

– Calcul de la longueur d'onde dans le vide du signal Wi-Fi

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

avec c la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, et $\nu = 2{,}4$ GHz la fréquence du signal indiquée par le document 1.

A. N. : $\lambda = \frac{3{,}0 \times 10^8}{2{,}4 \times 10^9} = 0{,}013$ m.

On admet que la longueur d'onde des ondes dans l'air a même valeur.

– Comparaison aux dimensions d'un arbre

Le phénomène de diffraction n'est nettement observé que lorsque la dimension d'un obstacle est du même ordre de grandeur ou plus petit que la longueur d'onde λ de l'onde. Or, on peut supposer que le tronc d'un petit arbre a un diamètre a de l'ordre d'une dizaine de centimètres.

Les ordres de grandeurs de a et λ sont comparables, donc on considère que le phénomène de diffraction se produira de manière sensible ici.

– Conclusion

Bien que le téléphone soit caché du drone par l'arbre, la diffraction par le tronc permettra au signal vidéo émis par le drone d'atteindre en partie le téléphone.

Toutefois, on peut envisager une baisse de la portée du signal et du débit de la transmission.

• **Le phénomène d'interférence est-il à prendre en compte ?**

Dans la situation étudiée, la présence de chemins multiples n'est pas évidente car il n'y a pas d'obstacle comme un mur placé sur le côté du trajet direct comme évoqué dans le document 2.

On peut faire l'hypothèse que le phénomène d'interférence n'affecte pas sensiblement ni la portée ni le débit de la transmission du signal vidéo.

• **Détection du signal vidéo**

– *Estimation de l'atténuation du signal*

Bien que l'arbre soit un obstacle à la propagation du signal, on suppose que la modélisation de l'atténuation du signal évoquée par le document 1 est valable dans notre situation :

$$A = 40 + 20 \times \log(d) ;$$

en considérant la distance $d = 40$ m de la ligne droite entre le drone et le téléphone.

A. N. : $A = 40 + 20 \times \log(40) = 72$ dB.

L'expression utilisée correspond au cas où il n'y a pas d'obstacle. La valeur obtenue pour l'atténuation est donc inférieure à la valeur réelle.

– *Puissance du signal reçu*

On suppose que le signal est émis par le drone avec une puissance $P_e = 100$ mW correspondant à la puissance d'émission maximale autorisée en France.

La puissance P_s du signal reçu par le drone vérifie :

$$A = 10\log\frac{P_e}{P_s}$$

$$\text{donc} \quad \log\frac{P_e}{P_s} = \frac{A}{10}$$

$$\frac{P_e}{P_s} = 10^{A/10}$$

$$\frac{P_s}{P_e} = 10^{-A/10}$$

d'où $P_S = P_e \times 10^{-A/10}$.

A. N. : $P_S = 100 \times 10^{-72/10} = 6{,}3 \times 10^{-6}$ mW.

– *Conclusion*

$P_s > 10^{-6}$ mW donc le téléphone semble capable de détecter le signal Wi-Fi émis par le drone.

• **Débit du signal vidéo**

Le débit nécessaire à la transmission du signal vidéo dans le cas de 30 images par seconde d'une taille de 200 kio chacune donne :

$D = 200 \times 1024 \times 8 \times 30 = 4{,}92 \times 10^7$ bit·s^{-1} = 49,2 Mbit·s^{-1}.

• **Conclusion et critique du résultat**

– Ce débit est inférieur au débit théorique maximal de 54 Mbit·s^{-1} indiqué par le document 1, donc une transmission du signal permettant d'observer une vidéo fluide est envisageable.

– Cependant, le résultat obtenu peut être considéré comme un débit maximal atteint dans la situation considérée car :

– on n'a pas pris en compte le phénomène d'interférences qui limite la portée et le débit du signal ;

– on n'a considéré que l'impact positif du phénomène de diffraction (étalement des directions de propagation de l'onde) et pas ses effets sur la portée et le débit ;

– on a admis la modélisation de l'atténuation évoquée par le document 1 alors que celle-ci correspond au cas où il n'y a pas d'obstacles ;

– on a supposé que le signal émis par le drone était maximal.

Ainsi, puisque le débit $D = 49{,}2$ Mbit.s^{-1} obtenu avec nos hypothèses est proche du débit théorique maximal de la connexion Wi-Fi de 54 Mbit.s^{-1}, on peut envisager que le débit réel soit inférieur au débit nécessaire pour obtenir une vidéo fluide. Dans cette situation, on visionnera alors peut-être une vidéo de moins bonne qualité (avec certaines images manquantes).

40. ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Transmission d'informations avec une télécommande

Pour cette évaluation, se reporter à la fiche-guide disponible sur le site :

sirius.nathan.fr/sirius2017

Collection SIRIUS
ÉDITION 2017

Physique Chimie Term S
ENSEIGNEMENT SPÉCIFIQUE

Une offre numérique complète pour animer vos cours

Pour l'enseignant

Les manuels numériques

Le manuel numérique simple

- L'intégralité du manuel à vidéoprojeter
- Des outils faciles à utiliser : zoom, cache, spot, surligneur, etc.

GRATUIT POUR LES ADOPTANTS
à télécharger sur le site Nathan

Le manuel numérique enrichi

USB

- L'intégralité du manuel, enrichi et personnalisable
- De très nombreuses ressources multimédias : 30 vidéos, 16 animations, 93 fiches-guides avec indicateurs de réussite, etc.
- Le livre du professeur

OFFRE DÉCOUVERTE GRATUITE
jusqu'au 31 décembre 2017
www.nathan.fr/offredecouverte

Gratuit sur le site de la collection

- Le livre du professeur
- 93 fiches-guides personnalisables
- Les ressources pour les activités et les exercices

À télécharger sur le site
sirius.nathan.fr/sirius2017

Pour l'élève

Le manuel numérique élève

- L'intégralité du manuel avec les ressources accompagnant les activités et les exercices
- Consultable à tout moment et partout
- Idéal pour alléger le poids des cartables

EN SAVOIR + manuelnumerique.com



ISBN 978-209-171965-8

DANGER
LE PHOTOCOPILLAGE TUE LE LIVRE

Nathan