

Physique

Livre du professeur

1^{re} S

Maquette : Nicolas Piroux.

Composition et mise en page : CMB Graphic

Schémas : Corédoc

www.hachette-education.com

© HACHETTE LIVRE 2005, 43, quai de Grenelle, F 75905 Paris Cedex 15.
I.S.B.N. 2.01.13.5383.1

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des articles L. 122-4 et L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et, d'autre part, que « les analyses et les courtes citations » dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite ».

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris), constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Sommaire

1. Ces interactions qui gouvernent le monde	7
2. Mouvement d'un solide indéformable	14
3. Forces s'exerçant sur un solide	23
4. Les lois de NEWTON.	37
5. Travail mécanique et puissance	48
6. Le travail, un mode de transfert d'énergie	54
7. Transferts d'énergie et énergie interne	67
8. Transferts d'énergie dans un circuit électrique	76
9. Comportement global d'un circuit électrique	87
10. Magnétisme	96
11. Forces électromagnétiques	111
12. Propagation de la lumière. Visibilité d'un objet	118
13. Miroirs plans et lentilles convergentes	127
14. Quelques instruments d'optique	136

Avant-propos

Indications pour l'utilisation du livre du professeur

Les chapitres du livre du professeur présentent :

- le rappel des objectifs du programme, des contenus, des connaissances et savoir-faire exigibles, les exemples d'activités et les commentaires publiés dans le Bulletin Officiel du ministère de l'Education Nationale (numéro hors série du 31 août 2000) ;
- le matériel et les produits utilisés par le professeur et les élèves. Il s'agit en général du matériel courant existant dans les lycées ;
- des commentaires sur le déroulement du chapitre. Les auteurs expliquent leur démarche et leurs choix, précisent leurs objectifs, indiquent les pré-requis éventuellement nécessaires pour aborder les divers paragraphes et donnent des conseils relatifs à la conduite des expériences et des travaux pratiques, à leur exploitation, ainsi qu'à la sécurité ;
- le corrigé de tous les exercices proposés dans le livre de l'élève ;
- des activités et des exercices complémentaires ;
- activités pour le cours ou pour « rechercher et expérimenter » ;
- exercices complémentaires avec leurs solutions ;
- des compléments scientifiques, volontairement succincts. Pour des informations plus complètes, les professeurs sont invités à se référer à la bibliographie mentionnée ;
- une description des ressources du cédérom pour le chapitre avec des propositions d'utilisation pédagogique avec les élèves ;
- une bibliographie référençant des ouvrages, vidéos, cédéroms et sites Internet.

Ces interactions qui gouvernent le monde

chapitre 1 physique

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

I. Les interactions fondamentales (durée indicative : 3 heures, 1 TP)

1. Particules élémentaires

2. Interactions fondamentales

Objectifs

Dans cette partie introductive, il s'agit de poursuivre la mise en place, entamée en classe de Seconde dans la partie « Échelles de distances et de tailles », des différents niveaux de structuration de la matière, du microscopique au macroscopique, en précisant les interactions dominantes à chaque échelle. Plus précisément, on illustre les deux idées suivantes :

- la diversité de la matière (noyaux, atomes et molécules, phases condensées ou gazeuses, organismes vivants, systèmes astronomiques) résulte de l'arrangement de trois « briques » de base, protons, neutrons et électrons, considérées au lycée comme particules élémentaires ;
- la cohésion de ces assemblages est assurée par trois interactions fondamentales :
 - l'interaction forte, de courte portée, qui contrebalance la répulsion entre protons et assure ainsi la cohésion des noyaux jusqu'à l'uranium,
 - l'interaction électromagnétique qui, par son aspect électrique, est responsable de la cohésion des atomes, des molécules et des phases condensées,
 - l'interaction gravitationnelle qui, bien que d'intensité beaucoup plus faible que les autres, gouverne la structure de la matière à grande échelle, car elle est de longue portée et toujours attractive.

Contenus

1. Particules élémentaires

- Les constituants de la matière : neutrons, protons, électrons.
- Charge élémentaire.

2. Interactions fondamentales

- La masse et l'interaction gravitationnelle ; loi de NEWTON.

- Les charges et l'interaction électrique ; loi de COULOMB ;

direction, sens, valeur : $F = \frac{k qq'}{d^2}$, avec $k = 9 \times 10^9$ SI.

Phénomènes d'électrisation.

Isolants ; conducteurs ; porteurs de charge : électrons et ions.

- Les nucléons et l'interaction forte.

Deux interactions à l'œuvre dans le noyau : la répulsion coulombienne entre protons compensée, jusqu'à l'uranium, par une interaction attractive intense, mais de courte portée.

3. Interactions et cohésion de la matière à diverses échelles :

- échelle astronomique ;
- échelle atomique et humaine ;
- échelle du noyau.

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Savoir que toute charge électrique est multiple d'une charge élémentaire.
- Connaître l'ordre de grandeur du rapport des masses du nucléon et de l'électron.
- Connaître l'ordre de grandeur du rayon d'un atome et d'un noyau.
- Réaliser et interpréter des expériences simples mettant en jeu des phénomènes d'électrisation.
- Connaître et savoir appliquer la loi de COULOMB.
- Savoir que dans un métal une fraction des électrons est libre de se déplacer dans tout l'échantillon, alors que dans un isolant les déplacements des charges sont inférieurs à la taille atomique.
- Savoir qu'au niveau du noyau s'exercent deux types d'interactions dont les effets sont opposés. Savoir que la cohésion de la matière est assurée par :
 - l'interaction gravitationnelle à l'échelle astronomique ;
 - l'interaction électromagnétique à l'échelle des atomes, des molécules et de la matière à notre échelle ;
 - l'interaction forte à l'échelle du noyau.

Exemples d'activités

- Illustrer par des études documentaires*, le fait que, du noyau atomique jusqu'aux systèmes astronomiques, la matière peut être considérée comme constituée de neutrons, protons et électrons.
- Observer et interpréter, à l'échelle atomique, les phénomènes tels que :
 - l'électrisation par frottement ;
 - l'attraction et la répulsion d'objets ;
 - le caractère conducteur ou isolant de certains matériaux.
- Observation sur une carte (N, Z) du domaine d'existence des noyaux atomiques.
- Comparaison des interactions électrique et gravitationnelle pour le système électron-proton.
- Discuter pourquoi l'interaction gravitationnelle est prédominante en général à l'échelle macroscopique.

Commentaires

L'interaction gravitationnelle a déjà été rencontrée en classe de Seconde. De l'interaction électromagnétique, seul l'aspect électrique est ici présenté. La force d'interaction entre deux charges est précisée : direction, sens,

valeur $F = \frac{k q q'}{d^2}$, avec $k = 9 \times 10^9$ SI ; elle est représentée sur les schémas par une flèche, mais aucune expression vectorielle de cette force n'est à donner. Une autre manifestation de l'interaction électromagnétique, l'action d'un champ magnétique sur un courant (particules chargées en mouvement) est présentée dans la partie III. B.

Une approche expérimentale des phénomènes d'électrisation permettra de justifier l'existence des deux types de charge et de préciser la nature attractive ou répulsive de leur interaction. Lorsque l'enseignant parle d'électrisation, le mot est pris dans un double sens : arrachage ou apport d'électrons (électrisation par contact), et déplacement interne de charges (phénomènes de polarisation) ; dans ce dernier cas, on se contente d'interpréter qualitativement les phénomènes par une distorsion locale de la distribution de charges, l'emploi du mot « polarisation » n'est pas exigé.

Une approche expérimentale des phénomènes d'électrisation permettra de justifier l'existence des deux types de charge et de préciser la nature attractive ou répulsive de leur interaction. Lorsque l'enseignant parle d'électrisation, le mot est pris dans un double sens : arrachage ou apport d'électrons (électrisation par contact), et déplacement interne de charges (phénomènes de polarisation) ; dans ce dernier cas, on se contente d'interpréter qualitativement les phénomènes par une distorsion locale de la distribution de charges, l'emploi du mot « polarisation » n'est pas exigé.

L'enseignant indiquera, en prenant divers exemples (tension d'un fil, résistance mécanique de la matière, ressort...), que l'interaction électromagnétique est responsable de la cohésion de la matière à notre échelle (y compris la matière vivante), mais veillera cependant à ne pas induire l'idée qu'elle suffit à elle seule à l'expliquer (la mécanique quantique joue un rôle fondamental).

L'interaction forte, qui n'est que citée à ce niveau, est présentée dans le cadre de la cohésion du noyau : si le noyau résiste à la forte répulsion entre protons, c'est qu'il existe une interaction attractive entre nucléons. On fait remarquer que lorsque le nombre de charges augmente, la répulsion électromagnétique finit par l'emporter : le tableau périodique des éléments naturels s'arrête ainsi à l'uranium. L'interaction faible ne sera pas introduite.

* Activités pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication.

La prédominance habituelle de l'interaction gravitationnelle sur Terre est expliquée par la quasi-neutralité électrique des objets macroscopiques et la grande masse de la Terre ; on remarque, de plus, que l'interaction gravitationnelle est négligeable entre deux objets de taille ordinaire.

Matériel

Cours

Pour la classe :

- Une machine de WHIMSHURST.
- Des fils de connexion.
- Une règle métallique.

Pour chaque groupe d'élèves :

- Des corps légers (morceaux de papiers, polystyrène, aluminium, ...).
- Un pendule électrostatique.
- Des tiges en verre et en PVC.
- Un chiffon de laine, un morceau de fourrure.
- Un étrier pour suspendre les tiges.

Déroulement du chapitre

Objectifs

- Connaître quelques caractéristiques des constituants de l'atome.
- Connaître et appliquer la loi de COULOMB.
- Savoir réaliser et interpréter des expériences d'électrostatique.
- Savoir quelles interactions assurent la cohésion de la matière à différentes échelles.
- Savoir que toute charge électrique est un multiple de la charge élémentaire.

Activités préparatoires

A. Les interactions au niveau atomique

Les activités préparatoires A et B permettent de revoir les notions vues en classe de Seconde sur la structure de l'atome et sur les forces d'interaction gravitationnelles.

Réponses aux questions

1. Un atome comporte un noyau (constitué de protons et de neutrons) entouré d'électrons.
2. « L'atome se comporte en fait, comme une véritable passoire ».

La plupart des « particules projectiles » traversent la matière comme si de rien n'était.

Cette observation permet à RUTHERFORD d'en conclure que la matière a une structure lacunaire.

3. La force d'interaction gravitationnelle.
4. Cette force a la direction de la droite joignant le centre du noyau au centre de l'électron. Elle est dirigée de l'électron vers le noyau de l'atome.

B. Les interactions au niveau cosmique

Réponses aux questions

1. L'interaction gravitationnelle.

2. Lorsqu'un gaz se contracte, les chocs entre les particules sont plus fréquents. Au niveau microscopique, il en résulte une augmentation de l'agitation des particules, ce qui correspond, au niveau macroscopique, à une augmentation de la température.

C. Petite histoire de l'électricité

Cet article de *La Recherche* permet de retracer les grandes lignes de l'histoire de l'électricité.

Réponses aux questions

1. L'ambre jaune attire les corps légers s'il est préalablement frotté.
2. Charles DU FAY a émis l'hypothèse des deux types d'électricités au début du XVIII^e siècle.
3. Au milieu du XVIII^e siècle, la notion de courant électrique apparaît.
4. D'après l'*encyclopaedia universalis*, « Le terme d'ambre est employé couramment par les minéralogistes et les paléontologistes pour désigner une résine fossile que l'on trouve principalement dans les sédiments des bords de la mer Baltique ».

D. Reproduire des expériences historiques

Cette activité est à rapprocher de la précédente, et permet aux élèves de reproduire les expériences décrites dans le texte de l'article de *La Recherche*.

Réponses aux questions

1. Électriser des matériaux et attirer des corps légers

1. Des matériaux isolants tels que le verre, les matières plastiques...
2. Le peigne qui attire les cheveux, les intercalaires en matière plastique qui se collent aux feuilles de papier...

2. Déceler deux types d'électricité

1. On observe des réactions différentes de la tige en PVC électrisée si l'on approche la tige de PVC électrisée ou une tige en verre électrisée.
2. On ne peut observer que seulement deux comportements de la tige : l'attraction ou la répulsion.
3. Avec des électricités de même nature, on observe une répulsion ; avec des électricités de natures différentes, on observe une attraction.
4. Il comparait le comportement du matériau électrisé soit à du verre soit à de la résine.

Cours

1. Quels sont les constituants de la matière ?

Le premier paragraphe du cours sert à réactiver les notions vues en classe de Seconde dans le cours de chimie sur la constitution de la matière.

➤ Activité 1

Cette activité va permettre aux élèves de mémoriser quelques ordres de grandeurs.

Le professeur reviendra aussi sur la charge des particules et sur l'ordre de grandeur des dimensions de l'atome.

Réponse à la question

Les électrons et les protons ont sensiblement la même

masse alors que l'électron possède une masse environ 2 000 fois plus petite.

2. Quelle est l'interaction liée aux masses ?

Ici aussi, ce paragraphe permet de revoir la notion d'interaction gravitationnelle abordée en classe de Seconde.

Cette force d'interaction est représentée sur les schémas par une flèche, mais aucune expression vectorielle de cette force n'est à donner.

3. Quelle est l'interaction liée aux charges électriques ?

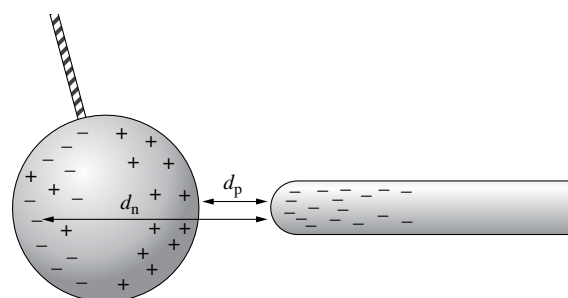
3.1 Électrisation par frottement

Ce premier paragraphe permet d'introduire les notions d'électrisation à partir d'expériences simples.

Le succès des expériences d'électrisation est aléatoire. Très souvent, les expériences peuvent échouer, car l'atmosphère de la classe est humide et les corps peuvent se décharger. Il n'est pas toujours évident de comprendre pourquoi la règle électrisée, donc chargée, attire des corps légers (non chargés).

On pourra l'expliquer en considérant des phénomènes d'influence.

Si l'on approche un corps chargé négativement d'un pendule, le barycentre des charges négatives va s'éloigner tandis que le barycentre des charges positives va s'approcher. La force attractive l'emporte, l'objet est attiré (voir le schéma ci-dessous).



Les élèves découvrent que les corps électrisés peuvent s'attirer ou se repousser. On arrive à la notion de signes des charges. On peut signaler que les signes ont été attribués de façon arbitraire.

Il est possible de montrer aux élèves une application spectaculaire du phénomène d'électrisation par frottement avec les machines électrostatiques.

➤ Interprétation microscopique

Le but de ce paragraphe est d'expliquer aux élèves en quoi consiste l'électrisation. Tous ces phénomènes s'expliquent par des transferts d'électrons. Bien insister afin que l'élève ne pense pas que, si un corps est électrisé positivement, c'est qu'on lui a apporté des charges positives ... On lui a enlevé des électrons !

On profite de ce paragraphe pour revenir sur la structure de l'atome et la notion de charge élémentaire.

3.2 Loi de COULOMB

La force d'interaction entre deux charges est précisée : direction, sens, valeur $F = \frac{k \cdot q \cdot q'}{d^2}$ avec $k = 9 \times 10^9 \text{ SI}$;

elle est représentée sur les schémas par une flèche, mais aucune expression vectorielle de cette force n'est à donner.

3.3 Conducteurs et isolants

L'expérience présentée demande que la règle soit fortement chargée (à l'aide de la machine de WHIMSHURST, par exemple) et le phénomène est très fugace.

4. Qu'est-ce qui assure la cohésion de la matière ?

➤ L'interaction gravitationnelle

Elle permet à tous les objets sur la surface de la Terre de rester liés à notre planète. Elle régit le mouvement des astres dans l'Univers.

Bien que ce soit la plus faible des interactions, elle est peu sélective, de portée illimitée et toujours attractive.

➤ L'interaction électromagnétique

C'est l'interaction qui assure la liaison des objets à l'échelle atomique. Comme l'interaction gravitationnelle, les conséquences de cette interaction se manifestent dans le monde macroscopique.

Sa portée est illimitée mais elle est soit attractive soit répulsive, ce qui réduit son action à de courtes distances.

➤ L'interaction forte

Elle permet de lier les quarks pour former des nucléons et lier ces derniers afin de former des noyaux. Elle est très intense mais de faible portée : elle n'excède pas le rayon du noyau atomique (ce qui explique qu'elle n'a été découverte qu'au début du xx^e siècle).

➤ L'interaction faible (complément)

Elle est environ 10^6 fois plus faible que l'interaction forte (d'où son nom) et de portée environ 100 fois plus courte. Ces effets permettent notamment la transformation d'un type de quark en un autre type ayant pour conséquence la transformation d'un proton en neutron.

Elle est responsable de certaines réactions nucléaires comme les désintégrations radioactives ou la fusion thermonucléaire. Elle agit sur la plupart des particules.

5. Actualité scientifique : les domaines de recherche actuels

Ce dernier paragraphe permet de présenter aux élèves les grands domaines de la recherche actuelle.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. Masses : La masse du proton est du même ordre de grandeur que celle du neutron. La masse de l'électron est environ 2000 fois plus petite.
Charges : Le neutron est neutre, l'électron porte une charge négative et le proton une charge positive.

2.

Particule	Masse (kg)	Charge (C)
électron	$9,1 \times 10^{-31}$	$-1,6 \times 10^{-19}$
neutron	$1,67 \times 10^{-27}$	0
proton	$1,67 \times 10^{-27}$	$1,6 \times 10^{-19}$

1. Il a perdu des électrons.
- Il a perdu 3 électrons.
- Al^{3+} .
1. La valeur de la force *double*.
2. La valeur de la force *est divisée par quatre*.
3. La valeur de la force *reste inchangée*.
4. $F_e = 7,2 \times 10^{-9} \text{ N}$.
1. Interaction électrique. Interaction électrique. Interaction forte.
2. Oui ; non, c'est l'interaction électrique.

Corrigés

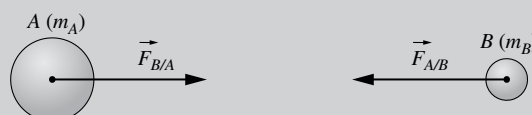
1. Électron ; neutron ; proton.
-

Particule	Masse (kg)	Charge (C)
électron	$9,1 \times 10^{-31}$	$-1,6 \times 10^{-19}$
neutron	$1,67 \times 10^{-27}$	0
proton	$1,67 \times 10^{-27}$	$1,6 \times 10^{-19}$

3. Ce sont les « briques » de base constituant toute matière.

1. Deux corps ponctuels A et B de masses m_A et m_B , séparés d'une distance d s'attirent. Le corps A exerce sur le corps B une force $\vec{F}_{A/B}$, le corps B exerce sur le corps A une force $\vec{F}_{B/A}$ telles que :
 - ces forces sont appliquées en A et en B ;
 - elles ont la même direction : la droite (AB) ;
 - elles ont la même valeur : $F_{A/B} = F_{B/A} = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}$
 avec G la constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;
 - elles ont des sens opposés.

2.



1. Deux corps ponctuels A et B de charges q_A et q_B , séparés d'une distance d s'attirent ou se repoussent. Le corps A exerce sur le corps B une force $\vec{F}_{A/B}$, le corps B exerce sur le corps A une force $\vec{F}_{B/A}$ telles que :
 - ces forces sont appliquées en A et en B ;
 - elles ont la même direction : la droite (AB) ;
 - elles ont la même valeur : $F = k \cdot \frac{q_B \cdot q_A}{d^2}$ avec $k = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$,

F s'exprime en newton (N), d en mètre (m) et q en coulomb (C) ;

– elles ont des sens opposés.

2. Les interactions électriques peuvent être soit attractives, soit répulsives, alors que les interactions gravitationnelles sont toujours attractives.

3. Dans les conducteurs métalliques les électrons peuvent circuler librement. Au contraire, les isolants ne permettent pas aux électrons de circuler librement. Ces derniers ne peuvent se déplacer qu'à l'échelle de l'atome.

4. 1. Interaction gravitationnelle ; interaction électromagnétique ; interaction forte.

2. Interaction gravitationnelle ; interaction électromagnétique.

3. Interaction forte.

5. 1. Il contient : 6 neutrons, 6 protons, 6 électrons.

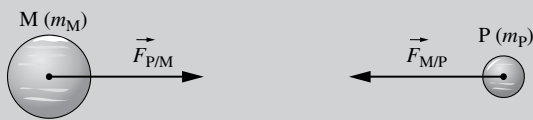
2. Carbone $^{12}_6\text{C}$.

3. Mine de crayon, diamant, fibre de carbone, charbon de bois, ...

6. 1. a. $F_{M/P} = F_{P/M} = G \cdot \frac{m_M \cdot m_P}{d^2}$.

b. $F = 5,4 \times 10^{15} \text{ N}$.

2.



7. a. Frottement du pull sur la peau ou sur un autre pull.

b. Frottement du peigne sur les cheveux.

c. Frottement de l'air sur la voiture.

d. Frottement du papier sur la matière plastique.

e. Frottements des vêtements entre eux dans le sèche-linge.

8. 1. Le verre se charge positivement.

2. a. Les électrons quittent le verre et vont sur la laine.

b. Les électrons quittent la laine et vont sur le PVC.

9. 1. Trois protons et trois neutrons.

2. $F_g = 3,5 \times 10^{-35} \text{ N}$.

3. $F_e = 43 \text{ N}$.

4. L'interaction électrique est répulsive. Il faut donc une autre interaction pour assurer la cohésion du noyau.

10. a. L'interaction forte assure la cohésion du noyau.

b. Vrai.

c. L'interaction forte s'exerce entre les nucléons.

d. Vrai.

e. L'interaction forte est de courte portée.

11. 1. a. Il s'agit des noyaux des atomes d'or. Ils sont positifs.

b. Ils sont positifs (répulsion).

c. Interaction électromagnétique.

2. a. Oui, car ces particules sont massiques.

b. Non, car elles coexistent.

c. $F_g = 1 \times 10^{-38} \text{ N}$.

Remarque : il manque dans les données le nombre de nucléons : $A = 197$.

d. $F_e = 1 \times 10^1 \text{ N}$.

e. L'interaction électrique est 10^{39} fois plus grande.

12. 1. Un électron et un proton.

2. Pour passer du noyau de diamètre 10^{-15} m à l'orange de diamètre $10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$, il faut multiplier les distances par 10^{14} .

Si on multiplie le diamètre de l'atome (10^{-10} m) par 10^{14} , on obtient une distance de $10^4 \text{ m} = 10 \text{ km}$ qui est l'ordre de grandeur de la distance entre la place de la Concorde et le périphérique.

13. 1. a. $d = 278 \text{ pm}$, soit $278 \times 10^{-12} \text{ m}$.

b. $a\sqrt{2}$; $a \frac{\sqrt{2}}{2} = 393 \text{ pm}$, soit $393 \times 10^{-12} \text{ m}$.

c. 393 pm , soit $393 \times 10^{-12} \text{ m}$.

2. a. $F = \frac{9 \times 10^9 \times (1,6 \times 10^{-19})^2}{(3,93 \times 10^{-10})^2} = 1,5 \times 10^{-9} \text{ N}$.

b. $1,5 \times 10^{-9} \text{ N}$.

c. $3 \times 10^{-9} \text{ N}$.

3. Chaque ion est soumis à des forces électriques qui se compensent.

14. 1. a. $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

b. Non, car les quarks portent des charges inférieures à e .

2. Proton : charge = $\left(\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3}\right)e = \frac{3}{3}e = e$;

neutron : charge = $\left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3}\right)e = 0$.

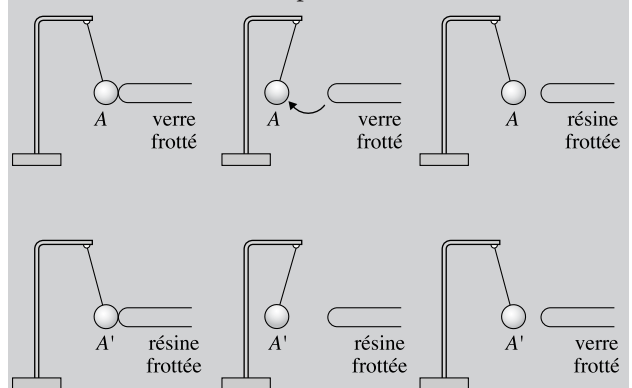
3. Interaction forte.

15. 1. a. Le métal est conducteur ; il permet à certains électrons de se déplacer librement.

b. Au contact du métal, le pendule se charge négativement ; il est alors repoussé.

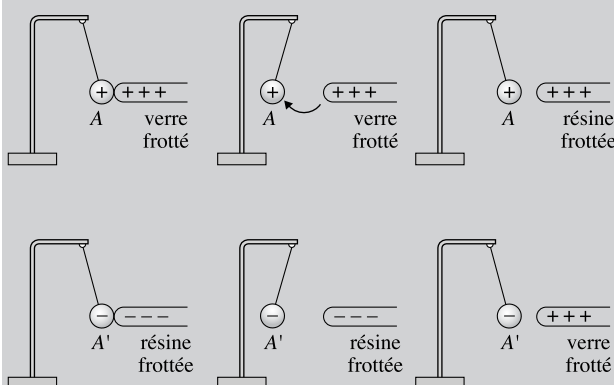
2. Le Plexiglas est un isolant ; les électrons restent liés aux atomes. Le pendule ne se charge donc pas.

16. 1. Schéma des expériences :



2. A, électrisé par contact avec le verre frotté, est attiré par la résine frottée et repoussé par le verre frotté. A', électrisé par contact avec la résine frottée, est repoussé par la résine frottée et attiré par le verre frotté. A et A' qui se comportent différemment portent des charges différentes.

3.



17. 1. L'interaction gravitationnelle.

2. a. Lorsqu'un gaz se contracte, les chocs entre les particules sont plus fréquents. Au niveau microscopique, il en résulte une augmentation de l'agitation des particules, ce qui correspond, au niveau macroscopique, à une augmentation de la température.

b. La contraction de la matière provoque une augmentation de la pression.

3. a. Nucléaire vient du latin *nucleus* (noyau).

b. Noyau de l'atome.

4. a. La température augmente.

b. Lorsque l'intensité du courant dans le filament d'une lampe à incandescence augmente, sa température croît. Le filament passe alors du rouge au jaune.

5. Lorsque l'étoile rayonne dans le visible, sa température s'est stabilisée : elle ne se contracte plus.

18. 1. Un milliard de milliards de milliards de milliards correspond à 10^{36} .

$$2. \frac{F_e}{F_g} = \frac{9 \times 10^9 \times (1,6 \times 10^{-19})^2}{6,7 \times 10^{-11} \times (1,7 \times 10^{-27})^2} = 1,2 \times 10^{36}.$$

3. La gravitation s'exerce sur des corps massiques alors que « la force électrique » s'exerce sur des corps chargés.

La gravitation est toujours attractive alors que la « force électrique » est soit attractive soit répulsive.

4. Ces deux forces ont des portées infinies.

5. À l'échelle macroscopique la matière est électriquement neutre.

6. a. $n = \frac{70 \times 10^3}{10} = 70 \times 10^2$ moles d'atomes dans le corps humain, soit 70×10^3 moles de protons, donc $4,2 \times 10^{28}$ protons.

b. Il y aurait $4,2 \times 10^{26}$ électrons en plus, soit une charge de $-67,2 \times 10^6$ C.

$$c. F_e = 1,1 \times 10^{26} \text{ N.}$$

d. Poids d'une masse équivalente à celle de la Terre : $6 \times 10^{24} \times 10 = 6 \times 10^{25}$ N (du même ordre de grandeur).

Exercices complémentaires

Énoncés

1. QCM

Indiquer les affirmations exactes.

1. Forces électriques

- a. Un corps électrisé attire les corps légers.
- b. On ne peut électriser un corps que par contact.
- c. Des corps qui portent des charges de signes opposés se repoussent.

2. Propriétés de la matière

- a. Tout corps chargé électriquement a une charge multiple de e.
- b. Un atome porte une charge électrique.
- c. Le noyau d'un atome est neutre.
- d. Un isolant ne laisse pas circuler les électrons.
- e. Un conducteur métallique laisse circuler les électrons.

3. Forces d'interaction

- a. La force gravitationnelle ne s'exerce que pour des distances supérieures au mètre.
- b. La force électrique s'exerce à toute distance.
- c. La force d'interaction forte entre nucléons s'exerce à l'échelle du noyau.
- d. La force électrique entre deux particules chargées est 100 fois plus forte que la force gravitationnelle.
- e. L'interaction forte est 100 fois plus forte que l'interaction électrique.

4. Des ordres de grandeur

a. La force d'interaction gravitationnelle entre un sac de ciment de 25 kg et la Terre est de :
 $2,5 \times 10^{-10}$ N ; 250 N ; 2,5 N.

b. La force d'interaction électrique entre deux charges de $10 \mu\text{C}$ situées à 10 cm l'une de l'autre est de :
 9×10^6 N ; 90 N ; 9×10^{-6} N.

c. La force d'interaction électrique entre un noyau de charge 8e et un électron situé à 150 pm est de :
 $8,2 \times 10^{-8}$ N ; $8,2 \times 10^8$ N ; 8,2 N.

2. Interactions dans le carbone 14

Le carbone 14 est un isotope radioactif du carbone qui permet la datation d'échantillons d'origine végétale ou animale.

Données :

- masse d'un nucléon $1,7 \times 10^{-27}$ kg ;
- masse d'un électron $1,7 \times 10^{-31}$ kg ;
- $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C ; $G = 6,7 \times 10^{-11}$ SI ;
- $k = 9,0 \times 10^9$ SI.

1. Le noyau ${}^{14}_6\text{C}$.

- a. Quelle est la composition du noyau ?
- b. Quelle est la masse d'un noyau de carbone 14 ?
- c. Quelle est la charge portée par le noyau ?
- d. Quelle est l'interaction qui assure la cohésion du noyau ?

Pourquoi faut-il que cette interaction soit prédominante à l'échelle du noyau ?

2. Interaction entre le noyau de carbone 14 et un électron

L'électron se situe à une distance $d = 70$ pm du centre du noyau.

a. Quelle est la valeur de l'interaction électromagnétique?

b. Quelle est la valeur de l'interaction gravitationnelle?

c. Combien de nucléons devrait contenir le noyau de carbone 14 pour que l'interaction gravitationnelle ait la même valeur que l'interaction électromagnétique?

Corrigés

1. **1. a.** **2. a.;** **d.;** **e.** **3. b.;** **c.;** **e.** **4. a. :** 250 N; **b. :** 90 N; **c. :** $8,2 \times 10^{-8}$ N.

2. 1. a. Six protons et huit neutrons.

b. $M = 14 \cdot m_n = 2,4 \times 10^{-26}$ kg.

c. $q = 9,6 \times 10^{-19}$ C.

d. L'interaction forte, sinon l'interaction électromagnétique ferait éclater le noyau.

$$\begin{aligned} \mathbf{2. a. } F_e &= \frac{9 \times 10^9 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 9,6 \times 10^{-19}}{(70 \times 10^{-12})^2} \\ &= 2,8 \times 10^{-7} \text{ N.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b. } F_g &= \frac{6,7 \times 10^{-11} \times 2,4 \times 10^{-26} \times 9,1 \times 10^{-31}}{(70 \times 10^{-12})^2} \\ &= 3,0 \times 10^{-46} \text{ N.} \end{aligned}$$

c. La masse du noyau devrait être $9,3 \times 10^{38}$ fois plus grande, soit contenir environ 10^{40} nucléons.

Bibliographie

Ouvrage

Théo KAHAN, *Les particules élémentaires*, « Que sais-je » PUF, 1990.

Revue

- *Sciences et vie junior*, « Le monde étrange des particules », Hors Série Octobre 1998.
- *Sciences et avenir*, « Comprendre la matière », Hors Série 99 décembre 1994.
- *Pour la science*, « Les particules élémentaires », 1983.
- *Les cahiers de science et vie*, « La vie de Coulomb ».
- *Revue du Palais de la découverte*, « Le théâtre de l'électrostatique », n° 227.

Sites Internet

<http://www.electropolis.tm.fr/>

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/maussion/elecstat/>

<http://www.cea.fr/fr/pedagogie/Atome>

<http://voyage.in2p3.fr/atome.html>

Mouvement d'un solide indéformable

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

I. Forces, travail et énergie

A. Forces et mouvements

1. Mouvement d'un solide indéformable

Contenus

1. Mouvement d'un solide indéformable

1.1. Vecteur vitesse d'un point du solide

1.2. Centre d'inertie d'un solide

1.3. Mouvement de translation d'un solide

1.4. Mouvement de rotation d'un solide autour d'un axe fixe ; vitesse angulaire

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Sur un enregistrement réalisé ou donné, déterminer et représenter le vecteur vitesse $\vec{v}$ d'un point mobile.
- Savoir que le vecteur vitesse $\vec{v}$ est le même pour tous les points d'un solide en translation.
- Savoir que chaque point d'un solide en rotation autour d'un axe fixe a une trajectoire circulaire.
- Pour un solide en rotation autour d'un axe fixe, relier la vitesse d'un point à la vitesse angulaire.

Exemples d'activités

- Observation du mouvement du centre d'inertie.
- Observation des mouvements des autres points (vidéos, chronophotographies...) *.
- Réalisation et exploitation d'enregistrements : table à coussin d'air, table à digitaliser, vidéos, capteurs chronométrés*...
- Détermination de vecteurs vitesses à partir d'enregistrements.
- Étude du mouvement du centre d'inertie d'un solide dans diverses situations (projectiles, satellites).

* Activité pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication.

Commentaires

Vitesse d'un point d'un solide

La valeur de la vitesse moyenne est introduite comme le quotient de la distance parcourue par la durée. La mesure approchée de la valeur de la vitesse d'un point est obtenue par le calcul de la valeur de la vitesse moyenne entre deux instants voisins.

Mouvement d'un solide

Connaître le mouvement d'un solide, c'est connaître le mouvement de chacun de ses points.

L'étude, dans le référentiel terrestre, du mouvement d'un solide soumis à la seule action de la Terre montre qu'il existe un point G dont le mouvement est plus simple que les autres : le centre d'inertie. Cette étude est conduite en référence à un ou deux exemples concrets et simples de situations de dynamique. On pourra, à cette fin, utiliser des enregistrements vidéo ou chronophotographiques de mouvements judicieusement choisis.

Matériel

Cours

> Activité 2

- Une règle en plastique.
- Pastilles autocollantes de couleurs différentes.
- Un caméscope numérique ou une webcam.
- Ordinateur, logiciels d'acquisition vidéo et de pointage d'images vidéo.
- Un vidéoprojecteur.

> Activité 3

- Une platine tourne-disques.
- Pastilles autocollantes de couleurs différentes.
- Un caméscope numérique ou une webcam.
- Ordinateur, logiciels d'acquisition vidéo et de pointage d'images vidéo.
- Un vidéoprojecteur.

Rechercher et expérimenter

- Balles.
- Un caméscope numérique ou une webcam.
- Ordinateurs.
- Logiciels d'acquisition vidéo, de pointage d'images vidéo et un tableur.

Déroulement du chapitre

Ce chapitre a pour but d'approfondir les connaissances acquises en classe de Seconde sur l'étude des mouvements et d'introduire le vecteur vitesse d'un point mobile comme représentant les caractéristiques du mouvement (direction, sens et valeur de la vitesse) d'un point à une date donnée. L'étude du mouvement de tous les points d'un solide étant complexe, un point particulier, appelé centre d'inertie, sera privilégié. Le chapitre s'achève par la présentation des caractéristiques des mouvements de translation d'un solide et de rotation d'un solide autour d'un axe fixe.

➤ Objectifs

- Déterminer et représenter le vecteur vitesse d'un point mobile.
- Savoir que le centre d'inertie d'un solide a généralement un mouvement plus simple que les autres points.
- Savoir que, pour un solide en translation, le vecteur vitesse est le même pour tous les points.
- Savoir que chaque point d'un solide en rotation autour d'un axe fixe a une trajectoire circulaire et savoir relier la vitesse d'un point à la vitesse angulaire.

Activités préparatoires

A. Chronophotographie et mouvement

Cette activité permet de réinvestir les notions étudiées en classe de Seconde sur les techniques d'enregistrements des mouvements. Pour le physicien souhaitant étudier le mouvement d'un solide, on fait à nouveau émerger la nécessité d'obtenir les positions occupées par ce solide, à intervalles de temps réguliers, le long de la trajectoire.

L'activité peut être prolongée par la réalisation d'un enregistrement vidéo, similaire à celui de l'activité 1, qui serait exploité par la suite pour la détermination de vecteurs vitesse.

Réponses aux questions

1. Une photographie est instantanée : elle permet de visualiser une position particulière. Une chronophotographie permet d'observer l'évolution de la position d'un objet en mouvement au cours du temps.
2. L'appareil photo permet plusieurs prises de vues successives à intervalles de temps consécutifs égaux sur le même négatif.
3. L'enregistrement vidéo avec l'exploitation à l'aide de logiciels de traitement des images, la table à digitaliser, le mobile autoporté muni d'un éclateur, le rail à air pulsé muni de capteurs optoélectroniques pour noter le passage du mobile...

B. Gare aux points du permis de conduire !

Cette activité permet d'introduire la notion de vitesse à un instant donné et de donner quelques exemples concrets d'appareils de mesure (compteur, radar). On approche également la difficulté d'étudier le mouvement de tous les points d'un solide, ceux-ci n'ayant pas tous la même vitesse. La notion de centre d'inertie n'est pas encore introduite à ce stade.

Un questionnaire des élèves peut être mené, en prolongement, sur d'autres exemples de détermination de vitesses à un instant donné (par exemple, vitesse de la balle de tennis lors du service, *document 1* du cours).

Réponses aux questions

1. Le radar mesure la vitesse d'un point de la carrosserie par rapport à la route, à un instant donné.
2. Non, la périphérie des roues, la carrosserie, les pistons du moteur ont des mouvements distincts : les différents points de ces éléments de la voiture ne se déplacent pas à la même vitesse par rapport à la route.
3. Non, quand l'automobiliste accélère ou freine, la vitesse d'un point de la carrosserie est modifiée.
4. Le compteur de vitesse mesure la vitesse du véhicule à un instant donné, d'un point de la carrosserie du véhicule par rapport à la route (donc par rapport à la Terre, soit dans le référentiel terrestre).

Cours

1. Comment définir la vitesse d'un point d'un objet ?

1.1. Vitesse à un instant donné

➤ Activité 1

L'étude de la chronophotographie de la chute d'une balle permet de revoir comment déterminer l'évolution de la vitesse sur un enregistrement à partir de la comparaison des distances parcourues pendant des durées égales, comme cela a été étudié en classe de Seconde. Une méthode permettant de déterminer la valeur de la vitesse en un point est ensuite proposée.

La chronophotographie illustrant cette activité peut être exploitée directement pour répondre aux questions, une échelle étant proposée.

Traditionnellement, le physicien détermine, sur un enregistrement, la vitesse en un point en effectuant le quotient de la distance parcourue entre deux positions encadrant ce point par la durée écoulée entre ces deux positions. Cette méthode semble ne pas correspondre à la définition de la vitesse à partir du nombre dérivé qui

sera faite en Terminale S : $v_x(t_2) = \left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=t_2} \approx \frac{x_2 - x_1}{\Delta t}$.

En effet, numériquement, l'approximation obtenue en utilisant la formule symétrique de la dérivée est

meilleure ; ainsi $v_x(t_2) \approx \frac{x_3 - x_1}{2\Delta t}$ avec $2\Delta t = t_3 - t_1$.

Les développements limités au voisinage d'un point x_0 s'écrivent :

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + h \cdot f'(x_0) + \frac{h^2}{2} \cdot f''(x_0) + \frac{h^3}{6} \cdot f'''(x_0) + \dots$$

$$f(x_0 - h) = f(x_0) - h \cdot f'(x_0) + \frac{h^2}{2} \cdot f''(x_0) - \frac{h^3}{6} \cdot f'''(x_0) + \dots$$

Par différence entre ces deux termes, on obtient :

$$\frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h} = f'(x_0) + \frac{h^2}{6} \cdot f'''(x_0) + \dots$$

$$\text{or } \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} = f'(x_0) + \frac{h}{2} \cdot f''(x_0) + \dots$$

La formule symétrique donne une approximation de la dérivée au point x_0 qui est en h^2 , alors que l'autre ne donne qu'une approximation en h . Or h est petit, la première est donc plus précise, ce qui justifie la méthode graphique utilisée par les physiciens. Cette méthode n'est toutefois pas applicable si la dérivée à droite est différente de la dérivée à gauche.

Ceci n'est évidemment pas à démontrer aux élèves. On évoquera seulement une meilleure précision en utilisant cette méthode graphique si les nombres dérivés ont déjà été étudiés en mathématiques.

Réponses aux questions

1. Pour une même durée, les distances parcourues par le centre de la balle ne sont pas constantes au cours du mouvement, donc la vitesse du centre de la balle n'est pas constante.
2. Le centre de la balle a parcouru une distance plus grande autour de A_4 qu'autour de A_8 pour une même durée, donc la vitesse est plus grande en A_4 qu'en A_8 .

1.2 Vecteur vitesse

Le vecteur est un outil mathématique déjà rencontré en classes de Troisième et Seconde pour représenter les caractéristiques d'une force. Il est à nouveau utilisé pour représenter les caractéristiques du mouvement d'un point : le vecteur vitesse permet ainsi d'indiquer la valeur de la vitesse, mais également la direction et le sens du mouvement au niveau du point considéré.

2. Quelle est la particularité du mouvement du centre d'inertie ?

➤ Activité 2

On propose d'étudier le mouvement de deux points différents d'une règle lancée dans le champ de pesantur. L'objectif est de montrer que le mouvement du centre de gravité étant plus simple que ceux d'autres points, l'étude du mouvement de celui-ci sera privilégié. La chronophotographie proposée peut être exploitée directement pour répondre aux questions.

Certains logiciels de pointage permettent de réaliser une chronophotographie à partir d'un enregistrement vidéo numérisé. C'est ainsi qu'a été obtenue la chronophotographie du *document 6a*.

Réponse à la question

La trajectoire de la pastille centrale est une branche de parabole alors que la trajectoire de l'autre pastille est une courbe quelconque.

3. Quelles sont les particularités d'un mouvement de translation ?

➤ Activité 3

On propose de dégager les caractéristiques d'un mouvement de translation. L'exemple proposé est celui d'une cabine d'un téléphérique. Pour prolonger l'activité, on peut demander aux élèves de rechercher d'autres exemples de solides ayant un mouvement dont les caractéristiques sont semblables (par exemple, nacelle de grande roue et tapis volants de fête foraine, escalier mécanique, etc.).

Réponses aux questions

1. Le segment AB se déplace parallèlement à lui-même : il conserve toujours la même direction.
2. Les trajectoires des points A et B sont deux courbes superposables.
3. À un instant donné, les distances parcourues par les points A et B sont égales, donc leurs vitesses instantanées sont égales.

4. Quelles sont les caractéristiques d'un mouvement de rotation ?

➤ Activité 4

L'objectif de l'activité est de construire la notion de vitesse angulaire de rotation. Les deux pastilles collées sur le plateau d'un tourne-disque, en rotation à des distances différentes du centre de la platine, n'ont pas la même vitesse. Pour rechercher une grandeur constante caractérisant le mouvement de rotation de la platine, on constate que l'angle balayé, pendant des durées égales, est le même pour les deux pastilles : la vitesse angulaire sera donc définie comme le quotient de l'angle balayé par la durée mise pour le parcourir.

Réponses aux questions

1. Les deux pastilles ont des trajectoires circulaires centrées sur l'axe de rotation de la platine.
2. Les secteurs angulaires balayés par les centres des deux pastilles sont égaux.
3. Pendant la même durée, la pastille la plus éloignée du centre parcourt une distance plus grande que l'autre pastille, sa vitesse est donc plus grande.

Rechercher et expérimenter

1. Jonglage avec trois balles

L'objectif de l'activité est d'exploiter un enregistrement vidéo à l'aide d'un logiciel de pointage et d'un tableur afin de déterminer la vitesse du centre d'inertie d'une balle à différents instants, chacun d'eux correspondant à une image vidéo. L'enregistrement sera préalablement réalisé par le professeur, puis mis à disposition des élèves, ou il pourra être réalisé par les élèves eux-mêmes. On peut également numériser la chronophotographie du *document 1* et l'exploiter à l'aide d'un logiciel de pointage (REGAVI de Mirelec permet, par exemple, de repérer les positions sur une chronophotographie).

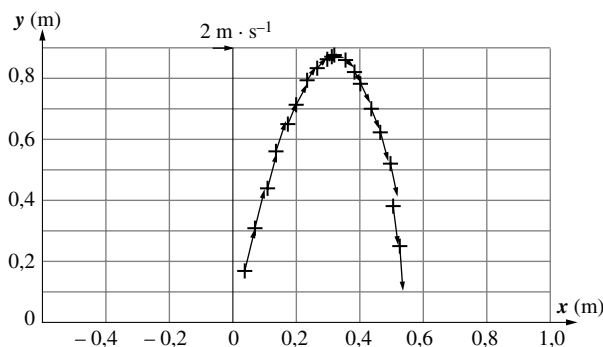
Réponses aux questions

1. La trajectoire enregistrée correspond à celle du centre de la balle verte et blanche. Le référentiel d'étude du mouvement est le référentiel terrestre où est posée la caméra.
2. La caméra vidéo enregistre 25 images par seconde, donc la durée entre deux images consécutives est $\Delta t = \frac{1}{25} = 0,040$ s, soit 40 ms.
3. Lors de la montée, les distances parcourues par la balle, pour des durées égales, diminuent ; donc sa vitesse diminue. Inversement, lors de la descente, la vitesse de la balle augmente, car les distances parcourues augmentent.

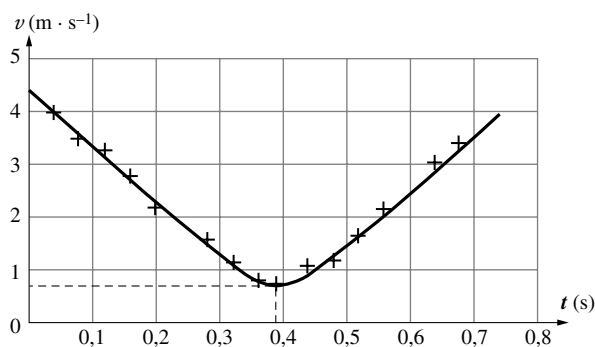
4. Vitesse instantanée du centre de la balle :

t (s)	x (m)	y (m)	d (m)	v (m · s ⁻¹)
0,00	0,00	0,00		
0,04	0,04	0,17	0,32	3,97
0,08	0,07	0,31	0,28	3,49
0,12	0,11	0,44	0,26	3,25
0,16	0,14	0,56	0,22	2,77
0,20	0,18	0,65	0,17	2,18
0,24	0,21	0,72	0,15	1,90
0,28	0,24	0,79	0,13	1,57
0,32	0,27	0,83	0,09	1,15
0,36	0,30	0,86	0,06	0,80
0,40	0,32	0,87	0,06	0,75
0,44	0,36	0,86	0,09	1,08
0,48	0,39	0,82	0,09	1,18
0,52	0,41	0,78	0,13	1,63
0,56	0,44	0,70	0,17	2,14
0,60	0,47	0,62	0,19	2,37
0,64	0,50	0,52	0,24	3,04
0,68	0,51	0,38	0,27	3,40
0,72	0,53	0,25	0,29	3,66
0,76	0,55	0,09		

5. Vecteurs vitesse :



6. Évolution de la vitesse instantanée au cours du temps :



7. a. Vitesse au sommet de la trajectoire : on détermine graphiquement la valeur minimale prise par v , soit $v = 0,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. Par extrapolation, en prolongeant la courbe $v(t)$ jusqu'à $t = 0 \text{ s}$, on lit la valeur de la vitesse à l'instant initial, c'est-à-dire la vitesse de lancement de la balle : $v = 4,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. Jonglage avec des cerceaux

Cette deuxième partie de l'activité permet d'exploiter un modèle mathématique proposé. En prolongement, un travail peut être mené avec le professeur de mathématiques pour représenter graphiquement la vitesse en fonction du temps à partir de l'expression proposée.

Réponses aux questions

1. À $t = 0 \text{ s}$, le cerceau est lancé avec une vitesse $v = v_0 > 0$, vitesse dirigée vers le haut.

Lorsque t augmente, $\|\vec{v}\|$ diminue, $\vec{v}$ ayant toujours le même sens que $\vec{j}$, le mouvement s'effectue vers le haut.

À la date $t = \frac{v_0}{g}$, $v = 0$, le cerceau a atteint le sommet de sa trajectoire.

Si t augmente encore, $\|\vec{v}\|$ augmente mais $\vec{v}$ est opposé à $\vec{j}$, le mouvement s'effectue vers le bas.

Le cerceau ralentit donc en montant, atteint une vitesse nulle au sommet de la trajectoire, puis change de sens et accélère en descendant.

2. Lors du changement de sens, la vitesse s'annule, ce qui n'était pas le cas de la « douche », car ici le cerceau est lancé verticalement alors que la balle avait une vitesse initiale oblique, c'est-à-dire avec une composante horizontale dont on pourrait montrer qu'elle reste inchangée au cours du mouvement.

3. À la date t_H , $v = 0$, soit $-g \cdot t_H + v_0 = 0$ et $t_H = \frac{v_0}{g}$.

4. $2t_H = 12 \times 700 = 8400 \text{ ms}$, soit $8,4 \text{ s}$.

5. $v_0 = g \cdot t_H = 9,8 \times 4,2 = 41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. 1. Reproduction de l'enregistrement sur une feuille de papier calque.

2. Sur l'enregistrement $d(P_0P_2) = 1,7 \text{ cm}$, soit $d(P_0P_2) = 17 \text{ cm}$ en réalité (échelle 1/10) :

$$v(t_1) = \frac{d(P_0P_2)}{\Delta t} = \frac{0,17}{0,050} = 3,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

De même, $d(P_5P_7) = d(P_5P_6) + d(P_6P_7) = 1,5 \text{ cm}$, soit $d(P_5P_7) = 15 \text{ cm}$ en réalité :

$$v(t_6) = \frac{d(P_5P_7)}{\Delta t} = \frac{0,15}{0,050} = 3,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. Avec l'échelle $1 \text{ cm} \leftrightarrow 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v(t_1)$ est représenté par un vecteur de longueur $3,4 \text{ cm}$ et $v(t_6)$ par un vecteur de longueur $3,0 \text{ cm}$.

2. 1. La trajectoire de B correspond à celle du centre d'inertie du mobile.

2. Le point A a un mouvement curviligne varié ; le point B a un mouvement rectiligne uniforme.

3. 1. Le plancher de la nacelle reste horizontal au cours du mouvement. De même, tout autre segment de la nacelle reste parallèle à lui-même au cours du

déplacement, donc la nacelle est animée d'un mouvement de translation.

2. La trajectoire du point A est un arc de cercle centré sur O de rayon OA . La trajectoire du point B est un arc de cercle de rayon R qui se déduit du précédent par une translation de vecteur $\vec{AB}$.

3. Le point O est fixe. Le segment OA a une longueur constante au cours du déplacement : A décrit des arcs de cercles, la translation est circulaire.

4. Au point A , le vecteur $\vec{v}_A$ est orthogonal à (OA) de longueur 2 cm en prenant comme échelle de représentation 1 cm $\leftrightarrow$ 1 m $\cdot$ s $^{-1}$. De même, le vecteur vitesse en D est orthogonal à $(O'D)$ et de même longueur que $\vec{v}_A$.

4. 1. A et B ont des trajectoires circulaires concentriques centrées sur O . A décrit un cercle de rayon 5 m et B un cercle de rayon 15 m.

2. $\omega = \frac{6,0 \times 2\pi}{60} = 0,63 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. $v_A = R_A \cdot \omega = 5,0 \times 0,63 = 3,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
et $v_B = R_B \cdot \omega = 15 \times 0,63 = 9,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. Les vecteurs $\vec{v}_A$ et $\vec{v}_B$ sont tangents aux cercles représentant les trajectoires de A et B et de longueurs respectives 1,6 cm et 4,7 cm en prenant comme échelle 1 cm $\leftrightarrow$ 2 m $\cdot$ s $^{-1}$.

Exercices

1. 1. $v(t_2) = \frac{d(P_1 P_3)}{t_3 - t_1} = \frac{P_1 P_3}{3\tau - \tau} = \frac{P_1 P_3}{2\tau}$ si la courbure est faible $d(P_1 P_3) = P_1 P_3$.

2. Il indique la direction et le sens du mouvement. Sa norme, déterminée à l'aide de l'échelle de représentation choisie, est égale à la valeur de la vitesse.

3. Son origine est en P_2 , il est tangent à la trajectoire au point P_2 , son sens est celui du mouvement, sa norme est égale à la valeur $v(t_2)$ de la vitesse.

2. 1. Le mouvement du centre d'inertie d'un solide est généralement plus simple que ceux des autres points de celui-ci.

2. Ballon : au centre de celui-ci ; cerceau : au centre de celui-ci ; plaque triangulaire : au point d'intersection des médianes ; cube : au centre de celui-ci.

3. Seule la proposition d. est bonne.

4. *Affirmations fausses rectifiées :*

1. Tous les points du solide ont des trajectoires circulaires qui ne sont pas identiques (donc pas superposables), sauf pour les points situés à la même distance de l'axe de rotation.

3. Les points situés à une même distance de l'axe n'ont une vitesse constante que si le mouvement de rotation est uniforme (vitesse angulaire constante).

5. Les points situés à la même distance de l'axe ont la même vitesse, mais n'ont pas tous le même vecteur vitesse au même instant. Seuls ceux qui sont situés à la même distance de l'axe et sur une droite parallèle à l'axe ont le même vecteur vitesse au même instant.

7. Dans le système international d'unité, la vitesse angulaire s'exprime en rad $\cdot$ s $^{-1}$ et non en tour $\cdot$ min $^{-1}$.

8. Pour un point situé à la distance R de l'axe, la vitesse v vaut $v = R \cdot \omega$ et non pas $v = \omega/R$.

Affirmations vraies justifiées :

2. Certains des points du solide ont la même vitesse au même instant : il s'agit des points situés à la même distance de l'axe.

4. Certains des points du solide ont le même vecteur vitesse à un instant donné : il s'agit des points situés à la même distance de l'axe et sur une droite parallèle à l'axe.

5. 2. En M_2 , $v(M_2) = \frac{d(M_1 M_3)}{\Delta t} = \frac{0,017}{0,040} = 0,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

et en P_6 , $v(P_6) = \frac{d(P_5 P_7)}{\Delta t} = \frac{0,022}{0,040} = 0,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6. 1. b. Le diamètre de la pièce sur la photo est 0,5 cm, donc l'échelle du document est : $\frac{0,5}{2} = \frac{1}{4}$.

1 cm sur le document représente en réalité 4 cm.

2. $v(t_2) = \frac{d(P_1 P_3)}{\Delta t} = \frac{0,022 \times 4}{0,080} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

et $v(t_3) = \frac{d(P_2 P_4)}{\Delta t} = \frac{0,018 \times 4}{0,080} = 0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Avec comme échelle 1 cm $\leftrightarrow$ 1 m $\cdot$ s $^{-1}$, $v(t_2)$ a pour longueur 1,1 cm et $v(t_3)$ 0,9 cm.

7. 2. La vitesse $v(t_4) = 240 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ est représentée par un vecteur de longueur 1,2 cm, donc l'échelle de représentation est 1 cm $\leftrightarrow$ $\frac{240}{1,2} = 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

3. Avec la même échelle, les vecteurs vitesse $\vec{v}(t_1)$, $\vec{v}(t_2)$ et $\vec{v}(t_3)$ ont pour longueurs respectives 1,3 cm, 1 cm et 0,9 cm.

8. 2. $v(G_2) = \frac{d(G_1 G_3)}{\Delta t} = \frac{0,023 \times 3}{0,080} = 0,86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

et $v(G_5) = \frac{d(G_4 G_6)}{\Delta t} = \frac{0,019 \times 3}{0,080} = 0,71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

En choisissant comme échelle 1 cm $\leftrightarrow$ 0,2 m $\cdot$ s $^{-1}$, $v(G_2)$ et $v(G_5)$ ont pour longueurs respectives 4,3 cm et 3,5 cm.

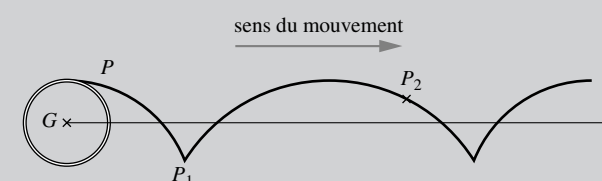
9. 1. La trajectoire du point A est curviligne.

2. G est situé à l'intersection des médianes du triangle.

3. Le mouvement de G est rectiligne et accéléré.

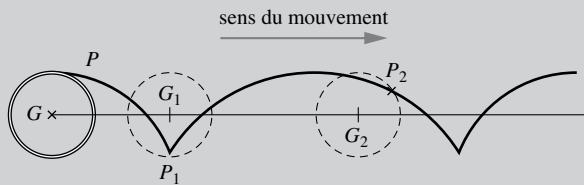
4. Un mouvement rectiligne peut être considéré comme plus simple à étudier qu'un mouvement curviligne.

10. 1. a.



b. Le mouvement de G est plus simple que celui des autres points, car il est rectiligne.

2.



11. 1. a. La carrosserie a un mouvement de translation rectiligne uniforme, car la tige fixée au pare-brise reste parallèle à elle-même et qu'entre deux prises de vue consécutives, la distance parcourue est constante.

b. Pour un mouvement de translation, un segment quelconque du solide reste parallèle à lui-même; les trajectoires de chacun des points du solide sont superposables, les vecteurs vitesse des différents points sont, à chaque instant, identiques.

2. a. Soit A un point de la carrosserie; $v(t_2) = \frac{d(A_1 A_3)}{\Delta t}$

$d(A_1 A_3) = 2,6$ cm sur la photo, soit :

$d(A_1 A_3) = 0,026 \times \frac{100}{12} = 0,217$ m en réalité, alors :

$$v(t_2) = \frac{0,217}{0,020} = 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. Tous les points de la carrosserie ont la même vitesse au même instant.

c. Au cours du déplacement, la vitesse d'un point de la carrosserie reste constante.

12. 1. Au cours du déplacement, le plancher de la cabine reste horizontal, donc la cabine est en translation. La translation est curviligne, car le point C' décrit une courbe.

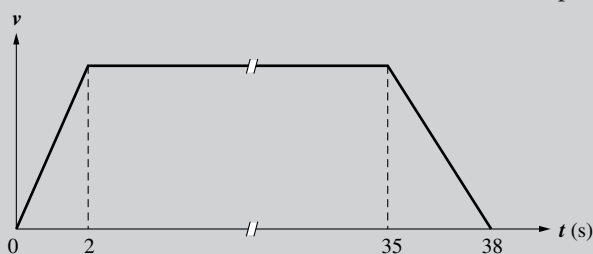
2. Tous les points de la cabine, en particulier A' et B' , décrivent des trajectoires semblables à celle de C' .

3. Les trois vecteurs vitesse sont des vecteurs égaux et parallèles entre eux à un instant donné.

4. a. La valeur de la vitesse est la même puisque la translation est uniforme.

b. Le vecteur vitesse change de direction puisque la trajectoire est curviligne.

13. 1. Évolution de la vitesse au cours du temps :



2. Entre $t = 0$ et $t = 2$ s, l'ascenseur passe de l'immobilité à une valeur de vitesse constante, donc sa vitesse augmente et son mouvement est rectiligne et accéléré.

Entre $t = 2$ s et $t = 35$ s, soit 3 s avant l'arrivée, l'ascenseur a un mouvement de translation rectiligne et uniforme, car sa vitesse est constante.

Entre $t = 35$ s et $t = 38$ s, l'ascenseur passe d'une vitesse constante à l'immobilité : sa vitesse diminue, donc son mouvement est rectiligne et ralenti.

14. 1. La porte est schématisée par un rectangle qui tourne autour d'un de ses côtés verticaux.

2. Le trou de la serrure décrit une trajectoire circulaire centrée sur l'axe de rotation, dans un plan perpendiculaire à cet axe.

3. C'est un mouvement de rotation autour d'un axe fixe tant que la porte est immobile. Quand la porte s'ouvre ou se referme simultanément à la rotation de la poignée, le mouvement de la poignée est plus compliqué.

15. 1. La roue est en rotation uniforme autour d'un axe perpendiculaire à son plan et passant par son centre. Le mouvement est uniforme puisque le disque blanc décrit des arcs égaux entre chaque prise de vue.

2. La roue fait un tour soit 2π radians en :

$$10 \times 40 = 400 \text{ ms};$$

$$\text{donc } \omega = \frac{2\pi}{0,400} = 15,70, \text{ soit } 16 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$3. v = R \cdot \omega = 0,25 \times 15,70 = 3,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. La période est la durée mise par la roue pour faire un tour, soit 400 ms.

$$16. 1. \omega = \frac{800 \times 2\pi}{60} = 83,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$2. v = R \cdot \omega = 0,23 \times 83,8 = 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

17. 1. b. La trajectoire du centre d'inertie est parabolique.

2. Sur la photographie, la règle jaune a pour longueur 4,8 cm, donc l'échelle du document est

$$1 \text{ cm} \leftrightarrow \frac{1}{4,8} = 0,21 \text{ m en réalité.}$$

$$\text{Donc } v(t_{16}) = \frac{d(M_{15} M_{17})}{\Delta t} = \frac{0,7 \times 0,21}{0,050} = 2,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. Son origine est en M_{16} , il est tangent à la trajectoire au point M_{16} , son sens est celui du mouvement vers le bas, sa norme est égale à la valeur v_{16} de la vitesse, soit $2,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. En prenant comme échelle $1 \text{ cm} \leftrightarrow 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\vec{v}(t_{16})$ a pour longueur environ 1,5 cm.

18. 1. La longueur L mesurée sur le document est égale à 3 cm. L'échelle est donc : $3/100$.

2. Les positions occupées par la tête du club, à intervalles de temps consécutifs égaux, sont de plus en plus éloignées : la vitesse de la tête de club **augmente**.

3. La longueur ℓ de la courbe parcourue par la tête de club entre les positions P_{11} et P_{13} , soit pendant la durée $\Delta t = 40$ ms est : $\ell = d(P_{11} P_{12}) + d(P_{12} P_{13})$, soit 4,1 cm sur le schéma.

Compte tenu de l'échelle, cette longueur est égale en réalité à 137 cm = 1,37 m.

La valeur de la vitesse en P_{12} est donc :

$$v(t_{12}) = \ell / 0,040 = 34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. Si on prend pour échelle des vitesses 1 cm pour $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, le vecteur vitesse en P_{12} sera un vecteur d'origine P_{12} , de direction $P_{11} P_{13}$, de sens P_{11} vers P_{13} et de longueur 18,5 cm.

19. 2. La trajectoire la plus simple est celle du point B : il s'agit d'une parabole.

3. Ce point est le centre d'inertie G de la massue.

20. 1. a. Vrai, car le mouvement est une translation.

b. Faux, car il n'est pas indiqué que le mouvement est uniforme.

c. Vrai, car la translation est rectiligne.

d. Vrai, car le mouvement est rectiligne.

e. Vrai, car le mouvement du footballeur est une translation.

2. a. Vrai, car le mouvement est une rotation autour d'un axe fixe.

b. Faux, car la vitesse d'un point dépend de sa distance à l'axe de rotation.

c. Faux, car si l'axe de rotation est bien le même pour tous les points du footballeur, les centres des cercles sont des points différents de l'axe.

d. Vrai, car tous les points d'un solide en rotation ont la même vitesse angulaire de rotation.

e. Faux, car la valeur de la vitesse d'un point dépend de sa distance à l'axe de rotation.

21. • Éléments en translation dans le référentiel de la route (soit le référentiel terrestre) : le cadre, le guidon, sont en translation rectiligne et la pédale est en translation circulaire.

• Éléments en rotation dans le référentiel du cadre : la roue avant, la roue arrière, le plateau du pédalier.

22. 1. a. $\omega = \frac{2\pi}{365,25 \times 24 \times 3600}$
 $= 1,99 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. $v = R \cdot \omega = 150 \times 10^6 \times 1,99 \times 10^{-7} = 29,9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. $v = \frac{227 \times 10^6 \times 2\pi}{1,881 \times 365,25 \times 24 \times 3600} = 24,0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Remarque : On retrouve un résultat connu, plus une planète est éloignée du Soleil, moins elle se déplace vite.

23. 1. Sur l'équateur, $v = R \cdot \omega = \frac{2\pi \cdot R}{T}$
 $v = \frac{2\pi \times 6380 \times 10^3}{86164} = 465,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

À une latitude 60° Nord ou Sud, $R' = R \cdot \cos 60^\circ$ donc $v' = v \cdot \cos 60^\circ = 232,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. a. Dans le référentiel géocentrique, il décrit une trajectoire circulaire de rayon $42\,200 \text{ km}$ en $86\,164 \text{ s}$, soit 1 jour.

b. $\omega = \frac{2\pi}{86164} = 7,2921 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; c'est la même vitesse angulaire que la Terre.

c. $v = \frac{2\pi \cdot R}{T} = \frac{2\pi \times 42\,200 \times 10^3}{86164} = 3077,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. $T = \frac{2\pi \cdot R}{v} = \frac{2\pi \times (6380 + 830) \times 10^3}{7550} = 6000 \text{ s}$.

La période de rotation de Spot II n'est pas la même que celle de la Terre, il est donc en mouvement par rapport à elle ; ce satellite n'est pas géostationnaire.

24. 1. À la vitesse de $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$v = \frac{130}{3,6} = 36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Durée mise pour parcourir une bande blanche :

$$\Delta t_1 = \frac{38}{36,11} \approx 1,1 \text{ s, pour parcourir deux bandes}$$

$$\text{blanches : } \Delta t_2 = \frac{14 + 38 \times 2}{36,11} \approx 2,5 \text{ s.}$$

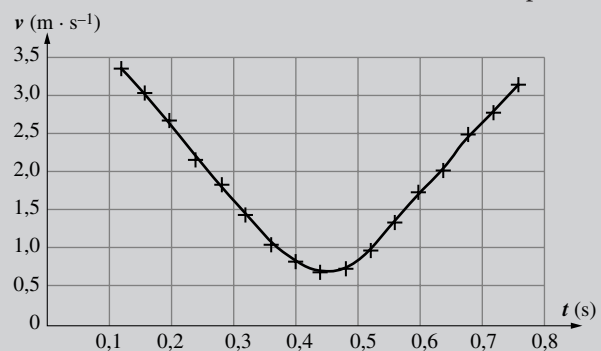
2. Avec une seule bande blanche, la durée est légèrement supérieure au temps de réaction. Le véhicule ne dispose donc pas d'une durée suffisante pour lui permettre de s'arrêter.

3. $\Delta f = 2 \times 2,5 \times 10^9 \times \frac{36,11}{(3 \times 10^8)} = 6,0 \times 10^2 \text{ Hz}$.

25. 1. et 2.

$t(\text{s})$	$x(\text{m})$	$y(\text{m})$	$d(\text{m})$	$v(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0,08	1,68E-02	1,64E-01		
0,12	3,78E-02	3,07E-01	2,68E-01	3,35E+00
0,16	5,89E-02	4,29E-01	2,43E-01	3,04E+00
0,2	7,57E-02	5,47E-01	2,14E-01	2,68E+00
0,24	1,01E-01	6,39E-01	1,73E-01	2,16E+00
0,28	1,30E-01	7,11E-01	1,46E-01	1,82E+00
0,32	1,56E-01	7,74E-01	1,15E-01	1,44E+00
0,36	1,77E-01	8,16E-01	8,25E-02	1,03E+00
0,4	1,98E-01	8,45E-01	6,60E-02	8,25E-01
0,44	2,31E-01	8,54E-01	5,41E-02	6,77E-01
0,48	2,52E-01	8,49E-01	5,80E-02	7,25E-01
0,52	2,78E-01	8,20E-01	7,72E-02	9,65E-01
0,56	3,03E-01	7,91E-01	1,08E-01	1,34E+00
0,6	3,32E-01	7,27E-01	1,38E-01	1,73E+00
0,64	3,57E-01	6,64E-01	1,61E-01	2,01E+00
0,68	3,87E-01	5,76E-01	2,02E-01	2,52E+00
0,72	4,16E-01	4,71E-01	2,23E-01	2,79E+00
0,76	4,50E-01	3,62E-01	2,52E-01	3,15E+00
0,8	4,79E-01	2,27E-01		

3. Évolution de la vitesse en fonction du temps :



4. La vitesse diminue quand la balle monte (y augmente), puis augmente quand la balle descend (y diminue).

5. La vitesse est minimale à la date $t = 0,45 \text{ s}$ quand la balle est au sommet de sa trajectoire (y maximal) ; elle vaut $0,69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Énoncés

1. Les aiguilles d'une horloge

Une horloge de bureau possède :

- a. une grande aiguille (aiguille des minutes) dont l'extrémité se trouve à la distance $L = 3,0$ cm de l'axe ;
- b. une petite aiguille (aiguille des heures) dont l'extrémité se trouve à la distance $\ell = 2,0$ cm de l'axe ;
- c. une trotteuse (aiguille des secondes) dont l'extrémité se trouve à la distance $\ell = 3,0$ cm de l'axe.

1. Calculer la vitesse angulaire de chaque aiguille.
2. Calculer la vitesse de l'extrémité de chaque aiguille.

2. Mouvement d'un point d'un mobile autoporteur

Le schéma ci-dessous présente une réduction de l'enregistrement des positions d'un point d'un mobile autoporteur. Ces positions sont relevées à intervalles de temps consécutifs égaux à 20 ms. La flèche indique le sens du mouvement. La distance réelle entre les deux premiers points est de 4,0 cm.

1. Après avoir reproduit le schéma, représenter la trajectoire.

Numéroter les positions de A_1 à A_6 .

2. Déterminer l'échelle de reproduction de cet enregistrement.
3. Calculer la valeur de la vitesse en A_2 et en A_5 .
4. Représenter les vecteurs vitesse en ces deux positions à l'échelle 1 cm pour $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

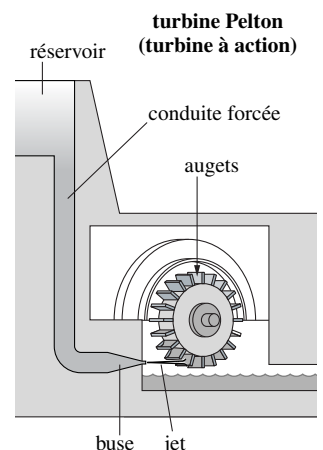


3. La turbine Pelton

La turbine Pelton est utilisée dans les centrales hydrauliques pour des hauteurs de chute d'eau H importantes pouvant aller jusqu'à 1 800 mètres, mais de débit assez faible ($\sim 25 \text{ m}^3/\text{s}$). Son diamètre D varie de 0,6 à 3,5 mètres. La roue Pelton est entraînée par un jet d'eau. Les aubes de la turbine sont partagées par une arête médiane qui relie deux godets. Le jet d'eau frappe l'arête, se partage en deux, puis arrive finalement dans les godets.

La vitesse v_1 périphérique de la roue est liée à la hauteur de chute par la relation $v_1 = 0,45 \times (2 \cdot g \cdot H)^{1/2}$

1. Caractériser le mouvement de la turbine.
2. Donner la relation entre la vitesse v_1 , le diamètre D de la turbine et la vitesse angulaire ω puis la relation entre ω , D et la hauteur de chute H .



26. 1. Entre deux points, la durée $\tau = \Delta t = 0,04 \text{ s}$.

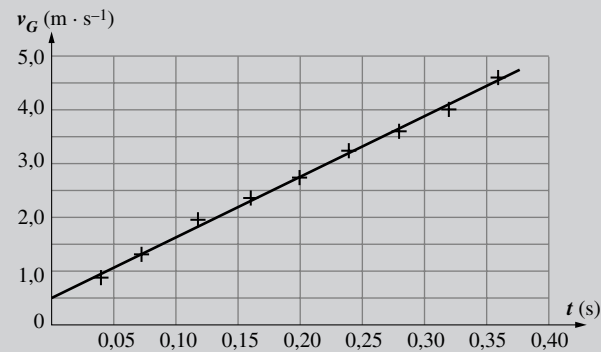
2. Le mouvement est accéléré, car la vitesse augmente ; il est rectiligne, car la chute de la balle se produit selon la verticale (axe Oz).

3. Non, car elle est exprimée avec trop de chiffres significatifs ; la réponse satisfaisante est $4,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. Le vecteur vitesse aura pour origine la position du centre de la balle à la date $t = 0,12 \text{ s}$, une direction verticale, il sera dirigé vers le bas et aura une longueur de 2,0 cm.

5. Non, l'élève ne sera pas pénalisé, car il n'est pas possible de déterminer la vitesse à ces deux dates.

6. a. Évolution de la vitesse v_G en fonction de t :



b. La représentation graphique de $v_G(t)$ est une fonction affine, donc la vitesse peut s'écrire $v = a + b \cdot t$ avec a ordonnée à l'origine représentant la vitesse initiale et b coefficient directeur de la droite.

c. À l'aide du tableur, on détermine $a = 0,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: il s'agit de la vitesse initiale de la balle.

d. À l'aide du tableur, on détermine $b = 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; l'écart avec la valeur théorique est $\left| \frac{11 - 9,8}{9,8} \right| = 0,12$, soit 12 %.

Remarque : L'unité de b est une vitesse par seconde ; il s'agit d'une accélération.

27. A. 1. $v = R \cdot \omega$; v s'exprime en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, R en m et ω en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. a. $\omega_1 = \frac{v}{R_1} = \frac{1,2}{0,0221} = 54 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. $\omega_2 = \frac{v}{R_2} = \frac{1,2}{0,0581} = 21 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Le lecteur est plus bruyant en début de lecture, car la vitesse de rotation est plus élevée.

4. La durée nécessaire pour la lecture d'une information est $\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{8 \times 0,278 \times 10^{-6}}{1,2} = 1,9 \times 10^{-6} \text{ s}$, soit 1,9 μs .

B. 1. La vitesse angulaire étant constante, la vitesse d'un point du disque dépend de sa distance à l'axe de rotation et celle-ci augmente de la première à la dernière piste.

2. Sur la première piste :

$$v_1 = R_1 \cdot \omega = 0,0221 \times \frac{400 \times 2\pi}{60} = 0,926 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Sur la dernière piste :

$$v_2 = R_2 \cdot \omega = 0,0581 \times \frac{400 \times 2\pi}{60} = 2,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

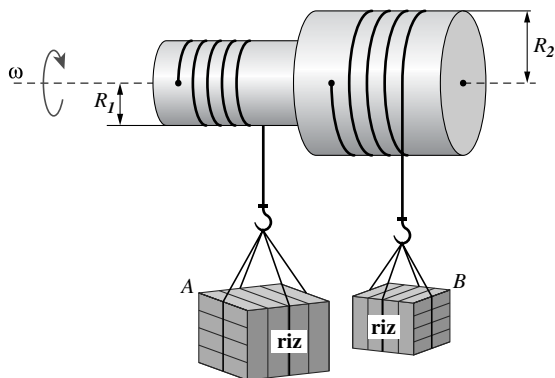
3. Une turbine du complexe de la Grande Dixence en Suisse tourne à 428 tours par minute pour une hauteur de chute de 1883 m. Sa masse est de 28 tonnes. L'eau sort des injecteurs à la vitesse de $680 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

a. Calculer le diamètre D de cette turbine.

b. Comparer la vitesse v_1 à celle de l'eau sortant des injecteurs.

Donnée : intensité de la pesanteur $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

4. Un treuil pour charger ou décharger un bateau



Un treuil utilisé dans un port est schématisé ci-dessous ; il est constitué par deux cylindres solidaires et coaxiaux, de rayons respectifs R_1 et R_2 . Sur chaque cylindre, s'enroule un câble auquel est accrochée une caisse. Lorsque le treuil est mis en rotation, les deux câbles s'enroulent en sens contraires. Ce système tourne alors à la vitesse angulaire de $20 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$; $R_1 = 20 \text{ cm}$ et $R_2 = 40 \text{ cm}$.

1. Décrire les mouvements des deux caisses A et B.

2. Calculer la vitesse d'un point situé à la circonférence de chaque cylindre.

3. En déduire les vitesses v_A et v_B des caisses A et B.

4. Refaire un schéma du système. Représenter sur ce schéma les vecteurs vitesses en A et en B en précisant l'échelle adoptée.

Corrigés

1. 1. Vitesse angulaire $\omega = 2\pi/T$, soit pour la petite aiguille (heures) : $1,5 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; la grande aiguille (minutes) : $1,7 \times 10^{-3} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; la trotteuse (secondes) : $0,10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. Vitesse de l'extrémité de l'aiguille $v = R \cdot \omega$, soit pour la petite aiguille (heures) : $2,9 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; la grande aiguille (minutes) : $5,2 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; la trotteuse (secondes) : $0,31 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. 2. Sur le schéma, on trouve $A_1A_2 = 13 \text{ mm}$ pour $4,0 \text{ cm} = 4,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ en réalité soit une échelle $\frac{13 \times 10^{-3}}{4,0 \times 10^{-2}} = 0,325$.

$$3. v(t_2) = \frac{d(A_1A_3)}{2 \times 0,020}$$

avec sur le schéma $d(A_1A_3) = 26 \text{ mm} = 26 \times 10^{-3} \text{ m}$,

$$\text{soit en réalité } d(A_1A_3) = \frac{26 \times 10^{-3}}{0,325} = 8,0 \times 10^{-2} \text{ m}.$$

$$v(t_2) = \frac{8,0 \times 10^{-2}}{40 \times 10^{-3}} = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$v(t_5) = \frac{d(A_4A_6)}{2 \times 0,020}$$

avec sur le schéma $d(A_4A_6) = \frac{16 \times 10^{-3}}{0,325} = 4,9 \times 10^{-2} \text{ m}$.

$$v(t_5) = \frac{4,9 \times 10^{-2}}{40 \times 10^{-3}} = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. $\vec{v}(t_2)$ est représentée par un vecteur de 2 cm, $\vec{v}(t_5)$ par un vecteur de 1,2 cm.

3. 1. La turbine est en mouvement de rotation autour d'un axe fixe.

$$2. v_1 = D \cdot \frac{\omega}{2}; \omega = 0,90 \cdot \frac{(2 \cdot g \cdot H)^{1/2}}{D}.$$

$$3. a. D = 0,90 \cdot \frac{(2 \cdot g \cdot H)^{1/2}}{\omega} = 3,85 \text{ m}.$$

$$b. v_1 = D \cdot \frac{\omega}{2} = 86,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 311 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Les vitesses sont du même ordre de grandeur.

4. 1. A descend, B monte.

$$2. v_1 = R_1 \cdot \omega = 0,20 \times \frac{20 \times 2\pi}{60} = 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{et } v_2 = R_2 \cdot \omega = 0,40 \times \frac{20 \times 2\pi}{60} = 0,84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$3. v_A = v_1 \text{ et } v_B = v_2.$$

4. Si on prend pour échelle des vitesses $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

- $\vec{v}_A$ sera un vecteur d'origine A, de direction verticale, de sens vers le bas et de longueur 2,1 cm ;

- $\vec{v}_B$ sera un vecteur d'origine B, de direction verticale, de sens vers le haut et de longueur 4,2 cm.

Bibliographie

Ouvrages

- *La vitesse*, actes des 8^e entretiens de la Villette, CNDP collection : documents, actes et rapports pour l'éducation, 1997.

- A. KOYRE, *Études galiléennes*, Hermann, Paris, 1966.

- A. KOYRE, *Études newtoniennes*, Hermann, Paris, 1969.

- LINDEMANN, *La mécanique*, de Boeck, 1998.

Forces s'exerçant sur un solide

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

II. Forces, travail et énergie

A. Forces et mouvements

2. Forces macroscopiques s'exerçant sur un solide

Objectifs

L'idée est de reprendre et d'approfondir les notions vues en Seconde en montrant comment une action s'exerçant sur un solide est capable de modifier son mouvement.

Contenus

Actions exercées sur un solide ; exemples d'effets produits (maintien en équilibre, mise en mouvement de translation, mise en mouvement de rotation, déformations).

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Identifier et représenter les actions qui s'exercent sur un solide.
- Prévoir dans des cas simples la possibilité de mise en rotation d'un solide autour d'un axe fixe.

Exemples d'activités

- Recherche de forces sur des exemples variés (expériences, vidéos, logiciels...)*.
- Utilisation du principe d'inertie pour analyser les forces qui agissent sur un solide, en mouvement ou non.

Commentaires

La description microscopique des actions subies par un corps nécessite en général la connaissance de tout un ensemble de forces réparties en volume ou à la surface de contact avec les autres corps ; pour l'étude du mouvement du centre d'inertie des corps, la connaissance de la résultante de chacune de ces diverses actions est suffisante, d'où la modélisation, à ce niveau, de chacune de ces actions en terme d'une force unique, par exemple :

* Activité pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication.

« résultante des forces de pesanteur » ou « résultante des forces de contact entre solides ».

Pour pouvoir mettre un solide en rotation autour d'un axe fixe, la droite support d'une force ne doit pas passer par l'axe ni être parallèle à cet axe. Les déformations élastiques sont à citer car elles conduisent en particulier, après étalonnage, à des appareils de mesure de forces (dynamomètres).

Il est signalé aux élèves que les forces macroscopiques qui s'exercent sur un solide (exception faite de celles de pesanteur) ont pour origine l'interaction électromagnétique ; on fait ainsi le lien entre le domaine de la mécanique et celui des interactions fondamentales étudié dans la partie précédente.

Matériel

Activité préparatoire B

- Un cristalliseur.
- Un œuf frais et un œuf vieux de plus d'un mois.

Cours

> Activité 2

- Un rail à coussin d'air avec chariot mobile.
- Une table à digitaliser avec mobile autoporteur.
- Une table avec mobile autoporteur muni d'un éclateur.

> Activité 3

- Une table avec mobile autoporteur muni d'un éclateur.
- Un niveau.
- Un appareil à force constante ou un aspirateur muni d'un piston coulissant relié à un fil.
- Un dynamomètre.

Rechercher et expérimenter

- Une potence et une noix.
- Un dynamomètre.
- Un éprouvette graduée.
- Masses marquées.
- Une série de solides de même volume, mais de masses différentes (on pourra utiliser des récipients de récupération différemment remplis de sable : tube d'aspirine, flacons de gélules, boîtes de pellicules photos).
- Une balance.
- Liquides de masses volumiques différentes (eau distillée, eau salée, cyclohexane...).
- Un densimètre.

Déroulement du chapitre

Ce chapitre a pour but d'approfondir les connaissances acquises en classe de Seconde sur l'effet des forces sur les mouvements d'un solide et d'introduire le vecteur force comme représentation symbolique de la force qui modélise l'action mécanique. L'application du principe d'inertie pour les solides au repos ou en mouvement rectiligne uniforme permettra de déterminer les caractéristiques (direction, sens et valeur de la force) des forces qui ne sont pas connues *a priori*, comme les tensions des fils, les réactions des supports...

► Objectifs

- Identifier et représenter les actions qui s'exercent sur un solide.
- Utiliser le principe de l'inertie pour déterminer les caractéristiques des forces qui agissent sur un solide, en mouvement ou non.
- Prévoir dans des cas simples la mise en rotation d'un solide mobile autour d'un axe fixe.

► Prérequis

- Une force se représente par un vecteur. Sa valeur s'exprime en N.
- Le poids $\vec{P}$ d'un corps est identifié à la force gravitationnelle exercée par la Terre sur le corps. Cette force est verticale, dirigée vers le bas et appliquée au centre de gravité G de l'objet.
- Une force qui s'exerce sur un objet peut le déformer, le mettre en mouvement, modifier sa trajectoire, modifier sa vitesse.
- Principe de l'inertie : « Dans un référentiel terrestre, tout corps qui n'est soumis à aucune force ou à des forces qui se compensent persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme ».

Activités préparatoires

A. Un sport en vogue dans les vagues

Cette activité a pour but de réactiver les prérequis sur les forces (identification) et leurs effets.

Réponses aux questions

1. Le kitesurfeur suspendu au filin est soumis à la force $\vec{T}$ exercée par le filin relié au cerf-volant, et à son poids $\vec{P}$. (Le kitesurfeur est également soumis à l'action de la planche que l'on négligera, car suspendu aux filins, le skysurfer ne repose plus sur sa planche; celle-ci est juste accrochée à ses pieds et l'on négligera son poids).
2. Si l'on assimile le kitesurfeur à un solide en translation, ces forces peuvent modifier constamment sa vitesse et sa trajectoire.

B. Méfiez-vous de l'œuf qui flotte...

Cette activité permet d'évoquer la poussée d'ARCHIMÈDE et de rappeler le principe d'inertie et la notion de forces qui se compensent. Une application quantitative sera faite lors de l'exercice 25, page 68 du manuel, et dans l'exercice complémentaire 4 du livre du professeur.

Réponses aux questions

1. Quand les œufs sont plongés dans l'eau, ils sont sou-

mis à leur poids $\vec{P}$ (attraction de la terre, action verticale dirigée vers le bas) et à l'action de l'eau sur le solide immergé $\vec{F}_A$ (poussée d'ARCHIMÈDE, action verticale dirigée vers le haut).

2. Si l'œuf est lâché sans vitesse initiale et coule, sa vitesse se modifie dans la direction verticale et augmente en descendant, la résultante de ces deux forces est donc dirigée verticalement vers le bas. Les deux forces ne se compensent pas et $\|\vec{P}\| > \|\vec{F}_A\|$.

3. L'œuf qui flotte est immobile, les deux forces se compensent, les vecteurs qui les modélisent vérifient $\vec{P} + \vec{F}_A = \vec{0}$ et $\|\vec{P}\| = \|\vec{F}_A\|$.

Cours

La progression choisie a pour objectif de réactiver certaines connaissances sur les forces (poids et réaction d'un support), d'en faire émerger de nouvelles (forces de frottement et poussée d'ARCHIMÈDE) et d'utiliser le principe d'inertie pour trouver les caractéristiques des forces inconnues.

1. Quelles actions mécaniques s'exercent sur un lustre ?

L'objectif de ce premier paragraphe est de présenter la méthode d'étude des forces exercées sur un solide et de faire découvrir le poids d'un solide (comme la résultante de l'attraction terrestre sur les éléments matériels) et la tension d'un fil ou d'un câble.

► Activité 1

Le système choisi est un lustre immobile dans le référentiel terrestre.

Réponse à la question

Définition du système : le lustre.

Identification des actions mécaniques qui agissent sur le système :

- action exercée par la Terre (verticale vers le bas) ;
- action du fil (selon le fil, verticale vers le haut).

Modélisation des actions mécaniques par des forces :

- action exercée par la Terre : poids $\vec{P}$, force verticale, vers le bas et de valeur $P = m \cdot g$, avec $g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P = 2,0 \times 10 = 20 \text{ N}$;
- action mécanique exercée par le fil : cette action est équivalente à une force $\vec{T}$ appliquée au point d'attache A du fil et dirigée suivant le fil.

Caractérisation de $\vec{T}$:

Le lustre étant au repos dans le référentiel terrestre, le principe de l'inertie permet d'écrire : $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$; soit $T = P = 20 \text{ N}$.

Représentation des forces :

Les forces sont schématisées par des vecteurs ; pour les représenter, il faut choisir une échelle.

À l'échelle 1 cm pour 10 N, les forces $\vec{P}$ et $\vec{T}$ sont représentées par des vecteurs opposés de longueur 2,0 cm.

2. Quelles actions mécaniques s'exercent sur un solide glissant sur un plan incliné ?

Ce paragraphe fera émerger la réaction d'un support et en particulier la notion de frottement.

2.1 Caractérisation des forces

La même méthode est appliquée au cas d'un snowboarder en translation rectiligne uniforme.

Ce snowboarder est soumis à son poids $\vec{P}$ et à la réaction $\vec{R}$ du sol.

De la même façon, l'application du principe d'inertie permet d'écrire la relation vectorielle $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ et de déterminer les caractéristiques de $\vec{R}$.

2.2 Effets de ces forces sur le mouvement

Cette étude est l'occasion d'observer l'effet des forces dans la direction du mouvement (selon la direction parallèle aux lignes de plus grande pente du plan incliné) et dans la direction perpendiculaire au mouvement.

Cela nécessite la décomposition des deux forces dans ces deux directions privilégiées et l'introduction de leurs composantes tangentielle (indice T) et normale (indice N); ceci permet de définir la force de frottement qui est la composante tangentielle de la réaction du sol.

2.3 Cas où les frottements sont négligés

L'étude précédente conduit naturellement à s'interroger sur l'évolution du système en l'absence de frottements.

> Activité 2

Il s'agit d'expérimenter l'éventuel équilibre d'un solide sur un plan incliné en l'absence de frottements.

L'expérience montre que l'équilibre est impossible, le mobile se met à accélérer dès la moindre inclinaison de la table ou du rail.

Réponses aux questions

1. Le mobile se met en mouvement dès que l'on incline le rail.

2. Le mobile est soumis à son poids vertical, vers le bas, et à la réaction du rail à coussin d'air perpendiculaire au rail et dirigée vers le haut.

La progression de cette étude présente l'avantage de faire découvrir de façon logique les caractéristiques de la réaction d'un support avec ou sans frottement.

3. Quelles actions mécaniques s'exercent sur un solide déplacé sur un plan horizontal ?

Dans le même esprit, il s'agit de confronter les élèves à une nouvelle expérience pour déterminer la valeur limite d'une force de frottement solide.

> Activité 3

Un palet soumis à des frottements est immobile sur une table horizontale. Un appareil à force constante le tire horizontalement avec une force d'intensité croissante. Pour une valeur F_m de cette force, l'équilibre du palet est rompu et il se met en mouvement.

Réponses aux questions

1. La valeur minimale F_m de la force de traction, qui met en mouvement le palet, dépend de la nature du contact entre le palet et la table. Elle est de l'ordre de quelques newtons.

2. Tant que le palet reste immobile, on peut appliquer le principe d'inertie : $\vec{P} + \vec{R}_N = \vec{0}$ selon la direction verticale et $\vec{R}_T + \vec{F}_m = \vec{0}$ selon la direction horizontale. La

force de frottement $\vec{R}_T$ s'oppose à la force de traction $\vec{F}_m$. Ainsi la valeur de la force de frottement s'adapte à la valeur de la traction.

Lorsque le palet se met en mouvement (non uniforme), le principe d'inertie ne peut plus être appliqué. La somme vectorielle des forces horizontales appliquées au palet n'est plus nulle, la traction a une valeur supérieure à celle de la force de frottement : $\|\vec{F}_m\| > \|\vec{R}_T\|$.

4. Quelle action exerce un fluide sur un solide immergé ?

Ce paragraphe étudie quelques systèmes soumis à la poussée d'ARCHIMÈDE.

Les caractéristiques de cette force sont étudiées et déterminées dans la rubrique *Rechercher et expérimenter*; elles sont simplement énoncées dans le cours.

5. Quelles forces peuvent mettre en rotation un solide mobile autour d'un axe ?

Dans tous les cas précédents, les solides étaient libre de se déplacer dans un fluide (air ou liquide) ou sur un plan. Ce dernier paragraphe s'intéresse à l'effet de rotation d'une force dans le cas où elle s'applique sur un solide mobile autour d'un axe fixe.

Signalons qu'une force unique n'est pas suffisante pour provoquer la rotation d'un solide autour d'un axe fixe. Il y a toujours des forces de liaisons autour de l'axe, qui, associées à la force motrice, assurent l'immobilité de l'axe. Nous n'avons pas abordé cette difficulté, car elle n'est pas évoquée dans le programme.

Rechercher et expérimenter

1. L'expérience historique d'ARCHIMÈDE : mythe ou réalité ?

Réponses aux questions

I. Premier protocole utilisant la comparaison des volumes d'eau déplacés

1. La masse de la couronne d'or est $m = 1\,000$ g. Le volume qu'elle occupe est donc :

$$V_{\text{couronne}} = \frac{m}{\rho_{\text{or}}} = \frac{1\,000}{19,3} = 51,8 \text{ cm}^3.$$

Elle est plongée dans un récipient d'eau cylindrique de diamètre $D = 20,0$ cm. Le volume d'eau déplacé sera égal au volume de la couronne et la variation h de niveau d'eau vérifie :

$$h = \frac{V_{\text{couronne}}}{S} \text{ où } S \text{ est la surface du récipient et } S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}.$$

$$\text{Ainsi : } h = \frac{V_{\text{or}}}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)} = 0,165 \text{ cm} = 1,65 \text{ mm}.$$

2. Le volume de la couronne est différent :

$$V_{\text{couronne}} = V_{\text{or}} + V_{\text{argent}} = \frac{300}{10,6} + \frac{700}{19,3} = 64,6 \text{ cm}^3.$$

Soit $h' = 0,206 \text{ cm} = 2,06 \text{ mm}$.

3. ARCHIMÈDE devrait détecter une variation de hauteur $\Delta h = h' - h = 0,041 \text{ cm}$, soit $0,41 \text{ mm}$.

Cette très faible différence de niveau n'est pas perceptible.

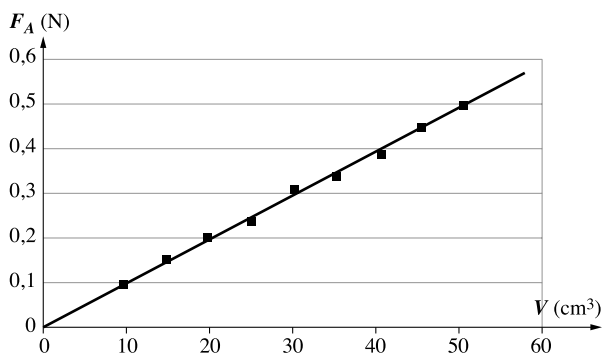
II. Deuxième protocole étudiant l'équilibre d'une balance

- D'après le schéma de l'expérience 1, l'équilibre de la balance est réalisé. La couronne et le lingot d'or ont le même poids, donc la même masse.
- D'après l'expérience 2, la balance n'est plus à l'équilibre. La couronne et le lingot d'or sont soumis, entre autres, à leur poids et à la poussée d'ARCHIMÈDE. Comme les poids sont identiques, les poussées d'ARCHIMÈDE diffèrent et celle exercée sur la couronne est plus forte.
- Comme la poussée d'ARCHIMÈDE a pour expression $F_A = \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot g$, V étant le volume immergé, le volume de la couronne est plus grand que celui du lingot d'or.
- La couronne et le lingot ont la même masse, mais le volume de la couronne est plus grand que celui du lingot, la masse volumique de la couronne est donc plus faible que celle du lingot.
- L'orfèvre a donc triché puisque la couronne n'a pas la masse volumique de l'or, ce n'est donc pas de l'or pur.

2. Vérification du principe d'ARCHIMÈDE au laboratoire

Réponses aux questions

- $F_A = m_{\text{liquide}} \cdot g = \rho_{\text{liquide}} \cdot V \cdot g$.
- a. Le dynamomètre mesure le poids apparent P_{apparent} du solide, c'est-à-dire la différence entre son poids P et la poussée d'ARCHIMÈDE F_A exercée par le fluide (eau) sur l'objet immergé.
b. Pour connaître la poussée d'ARCHIMÈDE, il faut au préalable mesurer le poids P du solide non immergé et faire la différence : $F_A = P - P_{\text{apparent}}$.
- Protocole :
– Prendre des solides de même volume, mais de masses différentes (billes calibrées ou récipients identiques contenant des quantités différentes de sable par exemple).
– Mesurer le poids P , puis le poids apparent P_{apparent} de chaque solide totalement immergé dans l'eau.
– En déduire la poussée d'ARCHIMÈDE $F_A = P - P_{\text{apparent}}$ dans les différents cas. On constate que F_A reste la même pour les différents solides de masses différentes, mais de même volume.
- La valeur F_A de la poussée d'ARCHIMÈDE est proportionnelle au volume V immergé, car la représentation graphique $F_A(V)$ est une droite passant par l'origine.



- On utilise le même objet de volume $V = 30 \text{ cm}^3$ que l'on immerge dans des liquides différents :

liquide	eau	eau salée	cyclohexane
$\rho \text{ (g} \cdot \text{cm}^3\text{)}$	1,0	1,2	0,78
$F_A \text{ (N)}$	0,30	0,36	0,23
F_A/ρ	0,30	0,30	0,29

La rapport F_A/ρ est constant. Donc F_A est proportionnelle à la masse volumique ρ du liquide.

- F_A est donc proportionnelle à la masse volumique ρ du liquide et au volume V du solide immergé.

$F_A = k \cdot \rho \cdot V$. En déterminant la constante de proportionnalité du graphique du 4., on trouve $k \cdot \rho$. Sachant que le liquide est de l'eau pour laquelle $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$, on déduit la valeur de $k \approx 10$. L'unité de k se déduit par analyse dimensionnelle; k s'exprime en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ c'est donc bien l'intensité de la pesanteur terrestre. L'expression de la poussée d'ARCHIMÈDE est bien validée : $F_A = \rho \cdot V \cdot g$.

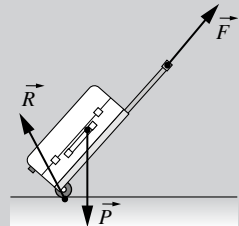
Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. Faux; 2. vrai; 3. vrai; 4. vrai; 5. faux.

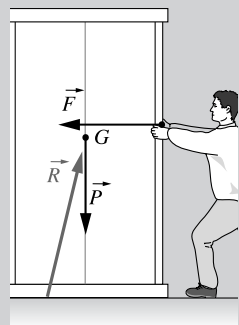
- La valise est soumise à son poids $\vec{P}$, à l'action du sol $\vec{R}$ et à l'action de la main de l'hôtesse de l'air $\vec{F}$.

Représentation des forces ci-contre :



1. Le meuble est soumis à son poids $\vec{P}$, à la réaction $\vec{R}$ du support et à la force $\vec{F}$ de poussée horizontale.

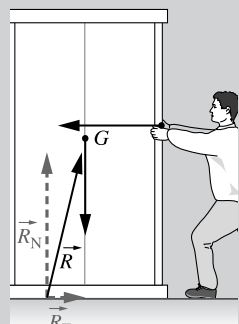
- $(\vec{R}_N, \vec{R}_T)$ sont les composantes verticale et horizontale de $\vec{R}$; $\vec{R}_T$ représente les forces de frottement.



- C'est la composante horizontale $\vec{R}_T$ de l'action du sol sur le meuble qui représente la force de frottement. Comme le meuble reste immobile, le principe d'inertie permet d'écrire :

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0}, \text{ soit } \vec{P} + \vec{R}_N = \vec{0} \text{ et } \vec{R}_T + \vec{F} = \vec{0}.$$

La force de frottement $\vec{R}_T$ s'oppose à $\vec{F}$, sa valeur est donc égale à 20 N.



- Une force est sans effet sur la rotation d'un solide mobile autour d'un axe de rotation, si sa direction est parallèle à l'axe de rotation ou si elle rencontre l'axe.

Action d'une main sur une poignée de porte, du vent sur une girouette, d'un enfant sur une balançoire...

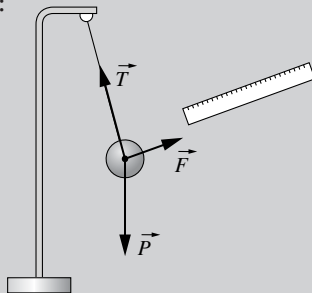
- 5. 1. a.** Poids $\vec{P}$ et réaction $\vec{R}$ du câble sur le pied.
b. Le funambule est en équilibre donc $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$, les deux forces sont verticales, elles ont la même droite d'action.
2. Le funambule ne pivote pas, car les forces ont leur droite d'action qui rencontre le câble (axe de rotation).
3. La mise en rotation est due au poids dont la droite d'action ne rencontre plus le câble dès que le funambule pivote.

Exercices

- 1. a.** Vrai; **b.** faux : par l'arc sur le bout de corde AB; **c.** vrai; **d.** vrai.

- 2. 1. et 2.** Action de la Terre : répartie en volume, exercée à distance, assimilable au poids; action électrique de la règle électrisée : répartie en volume, exercée à distance; action du fil : action de contact, localisée.

- 3.** Schéma :



- 3. 1.** $\vec{P}$ représente le poids de la luge et de son occupant; $\vec{R}$ représente les actions de contact réparties en surface exercées par la neige sur la luge.
2. On a dessiné $\vec{R}$ opposé à $\vec{P}$, car le mouvement est rectiligne et uniforme. Donc $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$, d'après le principe d'inertie.
3. La composante tangentielle (selon la pente) $\vec{P}_T$ du poids tend à entraîner la luge vers le bas de la piste tandis que la composante tangentielle $\vec{R}_T$ de la réaction de la piste tend à s'opposer au mouvement; la composante normale $\vec{P}_N$ du poids tend à enfoncer la luge perpendiculairement dans la neige tandis que $\vec{R}_N$ s'oppose à l'enfoncement.
4. $\vec{R}_T$ représente les forces de frottement.

- 4. 1.** $\vec{T}$ modélise l'action exercée par le câble tendu; $\vec{P}$ modélise le poids du cargo; $\vec{F}_A$ représente l'action exercée par l'eau et $\vec{F}_M$ représente l'action du moteur.
2. $\vec{P} + \vec{F}_A + \vec{T} + \vec{F}_M = \vec{0}$, d'après le principe de l'inertie.

- 5. 1.** $\vec{P}$ modélise le poids, action répartie en volume exercée à distance par la Terre; $\vec{F}_A$ modélise l'action de contact répartie en surface et exercée par l'eau sur la balle.

- 2.** $\vec{F}_A$ est la poussée d'ARCHIMÈDE; sa valeur est égale au poids du volume d'eau déplacé (poids d'un volume d'eau égal au volume de la balle immergée). La balle est en équilibre, donc $\vec{P} + \vec{F}_A = \vec{0}$. Ainsi la valeur de $\vec{F}_A$ est égale à celle de $\vec{P}$.

- 6. 1.** Le naufragé est soumis à son poids $\vec{P}$ et à la force $\vec{T}$ exercée par le filin.

- 2.** Modélisation des forces :

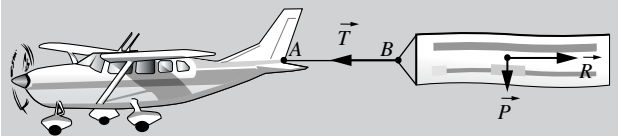
- 3.** Dans le référentiel terrestre, le mouvement du naufragé est rectiligne et uniforme, on peut donc lui appliquer le principe d'inertie :

$$\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}.$$



- 4.** La valeur T de la tension du filin est donc :
 $T = P = m \cdot g = 80 \times 9,8 = 7,8 \times 10^2 \text{ N}.$

- 7. 1.** La banderole est soumise à son poids (force $\vec{P}$ verticale descendante), à l'action exercée par l'air (force $\vec{R}$) et à l'action du câble tendu (force $\vec{T}$ horizontale vers l'avant).

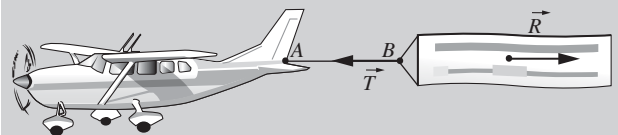


- 2.** L'avion et la banderole sont animés d'un mouvement de translation rectiligne uniforme. En vertu du principe de l'inertie, on peut écrire $\vec{P} + \vec{T} + \vec{R} = \vec{0}$.

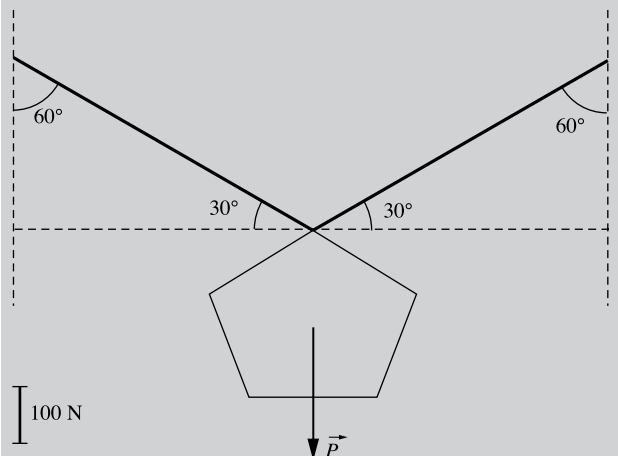
- 3.** Si on néglige le poids, on a : $\vec{T} + \vec{R} = \vec{0}$.

$\vec{T}$ et $\vec{R}$ sont des forces directement opposées, horizontales de droite d'action AB.

Le point d'application de $\vec{R}$ est sur l'horizontale passant par A et B, en un point de la banderole; son point d'application n'est pas *a priori* connu.



- 8. 1. et 2.**

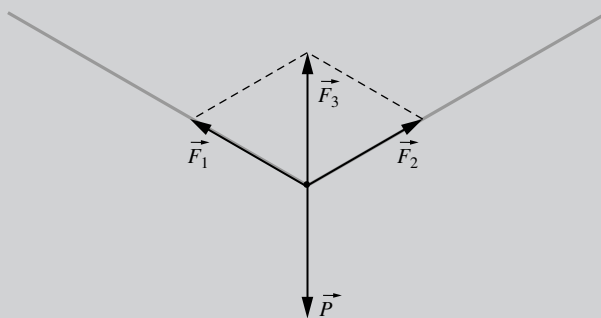


$$P = m \cdot g = 200 \text{ N}.$$

- 3. a.** À l'équilibre $\vec{P} + \vec{F}_3 = \vec{0}$.

- b.** $\vec{F}_3$ est représentée par un vecteur opposé à $\vec{P}$.

4.



Les triangles formés par $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ d'une part et par $\vec{F}_2$ et $\vec{F}_3$ d'autre part sont équilatéraux (tous les angles sont égaux à 60°), donc $F_1 = F_2 = F_3 = 200 \text{ N}$.

9. 1. $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ (relation 1); $R = P$.

2. $\vec{R} = \vec{R}_N + \vec{R}_T$.

La relation 1 s'écrit : $\vec{P}_N + \vec{P}_T + \vec{R}_N + \vec{R}_T = \vec{0}$.

Il n'y a pas de mouvement selon la ligne de plus grande pente : $\vec{P}_T + \vec{R}_T = \vec{0}$, soit $P_T = R_T$.

Il n'y a pas de mouvement selon la perpendiculaire au plan incliné : $\vec{P}_N + \vec{R}_N = \vec{0}$, soit $P_N = R_N$.

3. C'est $\vec{R}_T$ qui retient la boîte sur le plan ; elle représente les forces de frottement.

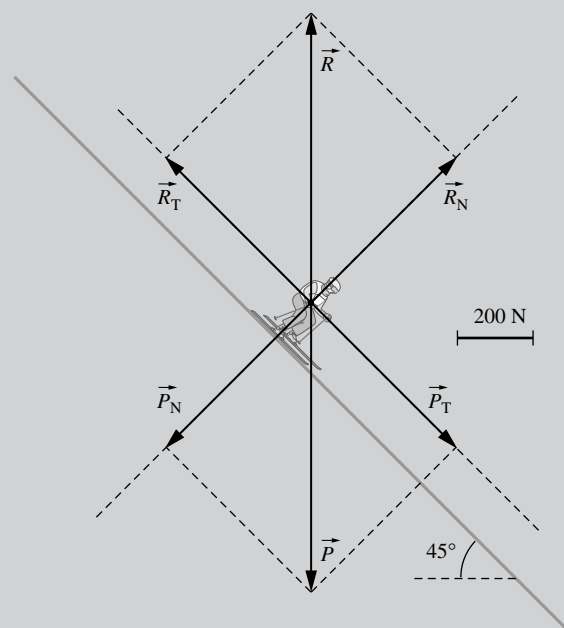
4. S'il n'y avait pas de frottement, $\vec{R}_T = \vec{0}$, $\vec{R}$ serait alors perpendiculaire au plan incliné et la relation (1) ne serait plus vérifiée, la boîte glisserait sur le plan incliné.

10. 1. Le mouvement devient une translation rectiligne uniforme.

2. Le skieur est soumis à son poids $\vec{P}$ et à la réaction $\vec{R}$ de la piste.

3. Principe d'inertie : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

4. et 5.



6. C'est la composante $\vec{R}_T$ qui modélise les frottements sur la neige.

7. $\vec{R}_T$ est représentée par un vecteur de 2,8 cm de longueur, donc la valeur de $\vec{R}_T$ est $R_T = 560 \text{ N}$.

11. 1. La buse est soumise à son poids $\vec{P}$ et aux forces de contact exercées par le sol de résultante $\vec{R}$.

2. a. La buse étant en équilibre $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$;

$P = R = m \cdot g = 100 \times 10 = 1,0 \times 10^3 \text{ N}$.

b. La surface de contact est un rectangle de 1,5 m de long et de largeur dépendant du contact avec le sol (selon la nature du contact et l'enfoncement plus ou moins important de la buse).

c. Le centre de gravité est un centre de symétrie de la buse. $\vec{R}$ et $\vec{P}$ ont la même droite d'action, verticale passant par G; $\vec{R}$ est donc appliquée au milieu du rectangle de la buse en contact avec le sol.

3. La surface de contact est un cercle. Le point d'application de $\vec{R}$ est au centre du cercle.

12. 1. a. La pierre est soumise à son poids, force exercée à distance par la Terre et répartie en volume, et à l'action du sol, force de contact répartie sur la surface de la pierre en contact avec la glace.

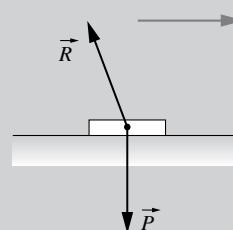
b. La force exercée par la Terre est le poids $\vec{P}$ et la force exercée par le sol est la réaction $\vec{R}$.

La boule étant en translation rectiligne uniforme, d'après le principe d'inertie : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

c. $\vec{P}$ est une force verticale descendante appliquée au centre de gravité G de la pierre et $\vec{R}$ une force verticale ascendante appliquée en un point A, situé à la verticale de G sur la surface en contact avec la glace (voir le schéma ci-dessous).

2. a. Le mouvement de la pierre est ralenti ; d'après le principe d'inertie $\vec{P} + \vec{R} \neq \vec{0}$. La réaction est maintenant inclinée vers l'arrière et s'oppose au mouvement.

b.



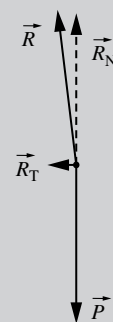
c. $\vec{P}_N = \vec{P}$ et $\vec{R} = \vec{R}_N + \vec{R}_T$.

Comme la pierre n'a pas de mouvement selon la normale au plan :

$\vec{P}_N + \vec{R}_N = \vec{0}$.

d. $\vec{R}_T$ représente les forces de frottement.

e. $R_T = \frac{P}{10} = \frac{R_N}{10}$.



13. 1. a. • Action de contact exercée par le fil tendu, localisée, modélisée par une force $\vec{F}$ horizontale, de valeur $F = 10 \text{ N}$.

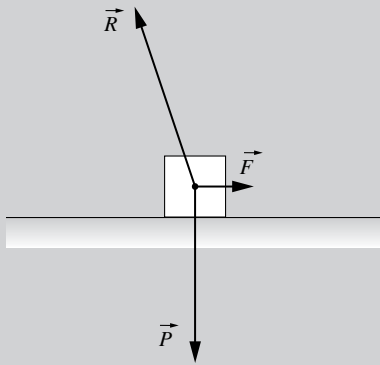
• Action exercée à distance par la Terre, répartie en volume, modélisée par le poids $\vec{P}$, force verticale descendante, appliquée au centre de gravité G de valeur :

$P = m \cdot g = 3,0 \times 10 = 30 \text{ N}$.

• Action de contact du support, répartie en surface, modélisée par la réaction $\vec{R}$, orientée vers le haut et s'opposant à la traction.

b. L'objet étant en équilibre : $\vec{F} + \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

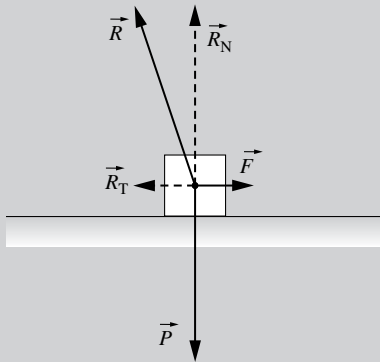
c. Schématisation des forces :



d. $\vec{F} = -\vec{R}_T$ et $\vec{P} = -\vec{R}_N$; la valeur de la force de frottement est donc $R_T = 10 \text{ N}$.

e. $R^2 = R_T^2 + R_N^2$ or $R_N = 30 \text{ N}$; d'où $R = 32 \text{ N}$; $\vec{R}$ fait avec la verticale un angle α tel que :

$$\tan \alpha = \frac{R_T}{R_N} = \frac{10}{30} = \frac{1}{3}, \text{ d'où } \alpha = 18^\circ.$$



2. a. Même réponse qu'en 1. a. avec $F = 15 \text{ N}$.

b. L'objet étant animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme : $\vec{F} + \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

c. d. et e. $R_T = 15 \text{ N}$, $R = 34 \text{ N}$ et $\alpha = 27^\circ$.

3. Si l'objet a un mouvement accéléré et $\vec{F} + \vec{P} + \vec{R} \neq \vec{0}$. Néanmoins, il n'y a pas de mouvement selon la verticale et on peut écrire $\vec{P} = -\vec{R}_N$. En revanche, selon l'horizontale, les forces ne se compensent plus et $F > R_T$.

14. a. Par une méthode graphique

D'après le principe d'inertie, comme le mouvement est rectiligne et uniforme, on a :

$$\vec{f} + \vec{P} + \vec{F} = \vec{0}.$$

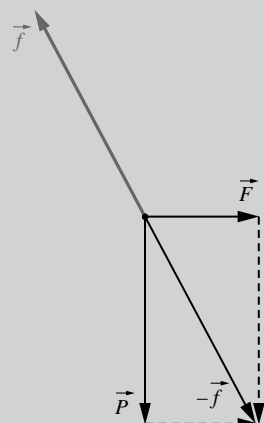
D'où $\vec{P} + \vec{F} = -\vec{f}$. On trace donc avec l'échelle ci-contre, les forces $\vec{P}$ et $\vec{F}$ ainsi que la somme $\vec{P} + \vec{F}$ qui est égale à $-\vec{f}$.

On mesure la longueur du vecteur $\vec{f}$; celle-ci est de 3,1 cm, ce qui donne avec l'échelle de représentation 886 N.

b. Par le calcul

En appliquant le théorème de PYTHAGORE :

$$f = \sqrt{400^2 + 800^2} = 894 \text{ N}.$$



On trouve des valeurs cohérentes compte tenu de la précision des mesures lors de la détermination graphique.

15. 1. Forces exercées : la force répartie en volume exercée à distance par la Terre, dont la résultante est le poids du navire, et la force de contact répartie en surface exercée par l'eau, dont la résultante est la poussée d'ARCHIMÈDE.

2. $F_A = \rho \cdot V \cdot g$.

3. Le navire est en équilibre $P = F$, soit $m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$;

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{6,8 \times 10^7}{1,03 \times 10^3} = 6,6 \times 10^4 \text{ m}^3.$$

16. 1. Chaque bille est soumise à l'action à distance, répartie en volume, exercée par la Terre (poids de la bille), ainsi qu'à l'action de contact exercée par l'huile répartie sur la surface de la bille.

2. a. Le poids est modélisé par un vecteur $\vec{P}$ vertical descendant appliqué au centre de gravité de la bille. L'action de l'huile peut être modélisée par deux vecteurs, le vecteur $\vec{F}_A$ représentant la poussée d'ARCHIMÈDE, de direction verticale ascendante appliquée au centre de poussée (centre de la bille) de valeur $F_A = \rho \cdot V \cdot g$ et le vecteur $\vec{f}$ représentant les forces de frottement visqueux, de même direction que le mouvement, de sens opposé à celui-ci et dont la valeur dépend du liquide et de la vitesse de la bille.

b. Schéma :



3. a. Le mouvement de chaque bille est rectiligne et uniforme.

b. $v_1 = 66 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_2 = 44 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. D'après le principe d'inertie :

$$\vec{P} + \vec{F}_A + \vec{f} = \vec{0}.$$

a. Les vecteurs forces sont colinéaires, d'après leurs sens on a : $P = F_A + f$;

donc : $m \cdot g = \rho_{\text{bille}} \cdot V \cdot g = \rho \cdot V \cdot g + a \cdot v$.

D'où :
$$v = \frac{\rho_{\text{bille}} \cdot V \cdot g - \rho \cdot V \cdot g}{a}.$$

b. La bille la plus dense (ρ_{bille} la plus élevée) a la vitesse limite la plus grande, c'est donc celle de gauche.

17. 1. Le gymnaste est soumis a :

– son poids $\vec{P}$, de droite d'action verticale descendante passant par la barre fixe, appliqué au centre de gravité G du gymnaste;

– aux forces $\vec{R}_A$ et $\vec{R}_B$ exercées par la barre sur chacune des mains du gymnaste. À l'équilibre $\vec{P} + \vec{R}_A + \vec{R}_B = \vec{0}$.

La résultante $\vec{R} = \vec{R}_A + \vec{R}_B$ de la force exercée par la barre sur le gymnaste est verticale ascendante, sa droite d'action passe par le centre de gravité du gymnaste et la barre.

Ces forces ont des droites d'action qui passent par l'axe de rotation : elles sont sans effet sur la rotation du gymnaste.

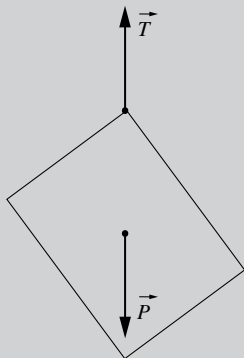
2. Si l'équilibre est rompu, le gymnaste est soumis aux mêmes forces, mais seule la droite d'action du poids ne passe plus alors par la barre (axe de rotation) : le poids provoque la rotation du gymnaste.

18. 1. La plaque est soumise à son poids $\vec{P}$ et la force $\vec{T}$ exercée par le fil de suspension. La plaque étant en équilibre $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$. Les droites d'action des deux forces sont verticales et passent par le centre de gravité G de la plaque qui est confondu avec le point d'intersection des médianes du rectangle.

2. Voir le schéma ci-après.

3. La tension est égale à la valeur de la force $\vec{T}$; or $T = P = m \cdot g$; d'où $T = 0,600 \times 10 = 6,0 \text{ N}$.

4. Schéma :

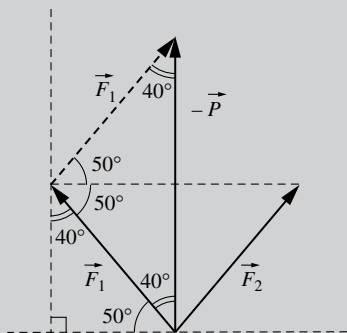


$\vec{P}$ et $\vec{T}$ sont représentés par des vecteurs de longueur 2 cm. L'échelle n'est pas respectée sur le schéma.

19. L'enseigne est soumise à son poids $\vec{P}$, aux forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ exercées par les câbles.

L'enseigne étant en équilibre : $\vec{P} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$, d'où $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -\vec{P}$.

Du fait de la symétrie du système, $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ ont même valeur; $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ et $-\vec{P}$ forment un triangle isocèle.



$$\text{Donc : } \frac{P}{2} = F_1 \cdot \cos 40^\circ = F_2 \cdot \cos 40^\circ;$$

$$\text{d'où : } F_1 = F_2 = \frac{P}{2 \cdot \cos 40^\circ} = 256 \text{ N.}$$

20. 1. Le container est soumis à son poids $\vec{P}$, force verticale descendante, et à la force $\vec{T}$ verticale ascendante exercée par le câble tendu. Le container étant immobile, d'après le principe de l'inertie :

$$\vec{P} + \vec{T} = \vec{0} \text{ et } P = T = m \cdot g = 5,2 \times 10^4 \text{ N.}$$

2. Le container est soumis aux mêmes forces. Il n'est ni immobile, ni animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme, donc $\vec{P} + \vec{T} \neq \vec{0}$. Le mouvement étant accéléré vers le haut $T > P = 5,2 \times 10^4 \text{ N}$.

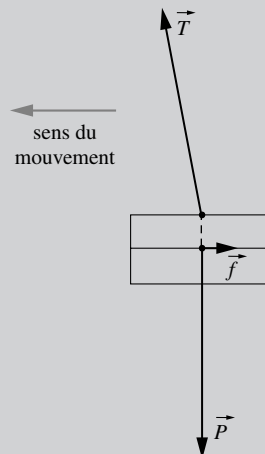
3. Le container est soumis aux mêmes forces. Le container étant animé d'un mouvement de trans-

lation rectiligne uniforme et d'après le principe de l'inertie on peut écrire :

$$\vec{P} + \vec{T} = \vec{0} \text{ et } P = T = m \cdot g = 5,2 \times 10^4 \text{ N.}$$

4. a. Le container est maintenant soumis à son poids $\vec{P}$, force verticale descendante, à la force $\vec{T}$ exercée par le câble et à l'action répartie en surface exercée par l'air, modélisable par une force $\vec{f}$ horizontale opposée au mouvement du container. Celui-ci étant animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme, d'après le principe de l'inertie : $\vec{P} + \vec{T} + \vec{f} = \vec{0}$.

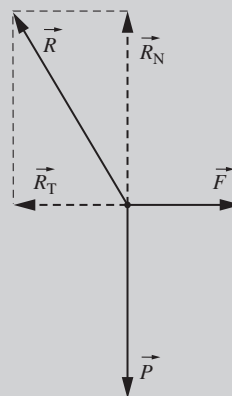
b. Le câble est incliné vers l'arrière par rapport à la verticale.



21. 1. Ce mouvement est un mouvement de translation rectiligne uniforme.

2. La skieuse est soumise à son poids $\vec{P}$, à la force de traction $\vec{T}$ exercée par la corde la reliant au bateau et à la résultante des forces de contact exercées par l'eau sur le ski. La poussée d'ARCHIMÈDE est négligeable, car la partie immergée du ski est très faible.

3.



$$\vec{R} = \vec{R}_T + \vec{R}_N.$$

4. Le mouvement étant rectiligne uniforme : $\vec{P} + \vec{F} + \vec{R} = \vec{0}$.

La force de frottement $\vec{f}$ est la composante $\vec{R}_T$ de $\vec{R}$ parallèle au mouvement, elle s'oppose au mouvement : $\vec{R}_T = \vec{f}$.

En considérant les composantes, dans la direction du mouvement on a : $F - f = 0$ et perpendiculairement au mouvement $P - R_N = 0$.

$$\text{Ainsi : } F = f = 100 \text{ N}$$

$$\text{et } R = \sqrt{R_T^2 + R_N^2} = \sqrt{P^2 + f^2} = 608 \text{ N,}$$

car $P = 600 \text{ N}$.

22. 1. Chaque boule en équilibre entre deux eaux est soumise à son poids $\vec{P}$, force verticale, vers le bas et

à la poussée d'ARCHIMÈDE $\vec{F}_A$, force verticale dirigée vers le haut, qui vérifient :

$$\vec{P} + \vec{F}_A = \vec{0}, \text{ donc } P = F_A.$$

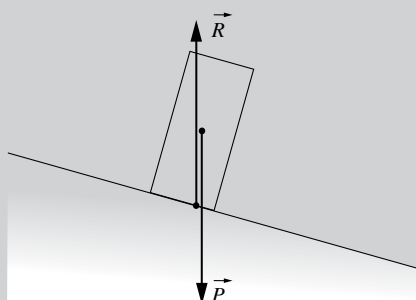
2. La masse volumique du liquide du récipient diminue quand la température augmente et *vice versa*.

3. Quand la température augmente, la poussée d'ARCHIMÈDE qui s'exerce sur une boule entre deux eaux diminue et devient inférieure à son poids. La boule tombe alors au fond du récipient.

4. Quand la température s'élève, le nombre de boules au fond augmente.

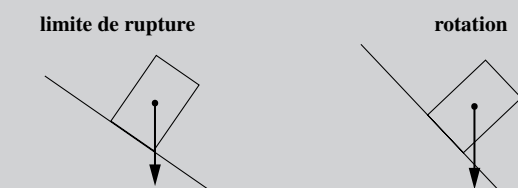
5. Les boules qui sont au fond indiquent une température plus basse que la température ambiante.

23. 1. La brique est soumise à son poids $\vec{P}$ et à la résultante $\vec{R}$ des actions de contact exercées par le support. À l'équilibre $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$. La réaction $\vec{R}$ n'est pas perpendiculaire au support; il y a donc des frottements.



2. a. Le poids $\vec{P}$ est responsable de la rotation de la brique autour de son arête inférieure, car sa direction amène la brique à tourner.

b. À la limite de la rupture d'équilibre, la verticale passant par le centre de gravité (droite d'action du poids) passe par l'arête inférieure. Il y a rotation lorsque la droite d'action du poids traverse le support en un point situé en avant de l'arête inférieure de la brique.



c. À la limite de la rupture d'équilibre, l'angle α que fait le plan avec l'horizontale est tel que la diagonale du rectangle 6×22 passe par la verticale.

$$\text{Soit } \tan \alpha = \frac{6}{22}, \text{ soit environ } \alpha = 15^\circ.$$

24. Expérience 1 : la poussée ne dépend pas de la profondeur d'immersion du solide.

Expérience 2 : la poussée dépend de la nature du fluide dans lequel est immergé le solide.

Expérience 3 : à volume identique, la poussée d'ARCHIMÈDE ne dépend pas du poids de l'objet, car dans les deux cas, elle vaut $1,9 - 1,2 = 6,2 - 5,5 = 0,7 \text{ N}$.

25. 1. Pour mesurer le volume de l'œuf, on procède de la manière suivante : dans une éprouvette graduée contenant un volume d'eau V_1 , plonger l'œuf et

noter le volume V_2 ; le volume de l'œuf correspond à la variation de volume $V_2 - V_1$.

2. a. Poids de l'œuf $= m_{\text{œuf}} \cdot g$; poussée d'ARCHIMÈDE : $\rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{œuf}} \cdot g$.

Comparons $m_{\text{œuf}}$ et $\rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{œuf}}$

Pour l'œuf frais : $m_{\text{œuf}} = 62,31 \text{ g}$ et $\rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{œuf}} = 57,0 \text{ g}$. Le poids est supérieur à la poussée d'ARCHIMÈDE, l'œuf coule.

b. Pour l'œuf de 28 jours : $m_{\text{œuf}} = 56,36 \text{ g}$ et $\rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{œuf}} = 57,0 \text{ g}$. La poussée d'ARCHIMÈDE est supérieure au poids et l'œuf remonte à la surface. Une partie émerge de sorte qu'à l'équilibre la valeur de la poussée exercée sur le volume immergé soit égale à celle du poids.

3. L'œuf flotte entre deux eaux quand :

$$m_{\text{œuf}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{œuf}} = 57,0 \text{ g}.$$

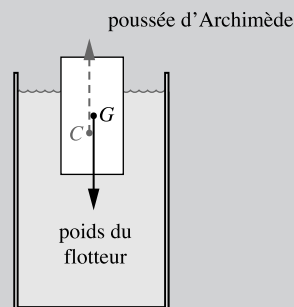
26. 1. Le flotteur est soumis à son poids et à la poussée d'ARCHIMÈDE.

Les deux forces sont opposées, car le flotteur, soumis à ces deux seules forces, est en équilibre :

– poids : $P = m \cdot g = 127 \times 10^{-3} \times 9,81 = 1,25 \text{ N}$;

– poussée d'ARCHIMÈDE : $F_A = 1,25 \text{ N}$.

2. Principe d'ARCHIMÈDE : « La poussée d'ARCHIMÈDE exercée sur un corps immergé dans un fluide est égale au poids du volume de fluide déplacé ».



D'après la question 1.,

$F_A = P$; or l'expérience faite par les enfants montre que la masse (« le poids ») du volume de fluide déplacé est aussi égal à la masse (au « poids ») du flotteur.

3. a. Dans l'eau douce ou dans l'eau salée, la poussée d'ARCHIMÈDE est toujours la même puisqu'elle est égale au poids du flotteur (en équilibre).

b. Le volume d'eau douce déplacée est plus grand puisque le flotteur s'enfonce plus.

c. La masse d'eau douce recueillie est la même que celle du flotteur, mais il en faut un plus grand volume que d'eau salée pour faire la même masse, car sa masse volumique est plus faible.

4. L'œuf qui coule dans l'eau est soumis à son poids (vertical vers le bas) de valeur P et à la poussée d'ARCHIMÈDE verticale et vers le haut, de valeur F_A . Comme l'œuf coule, $P > F_A$.

5. La masse de l'œuf est supérieure à la masse d'eau déplacée de même volume, donc $\rho_{\text{œuf}} > \rho_{\text{eau}}$.

6. Si l'œuf flotte $P < F_A$, la masse de l'œuf est inférieure la masse d'eau salée de même volume, donc $\rho_{\text{œuf}} < \rho_{\text{eau salée}}$.

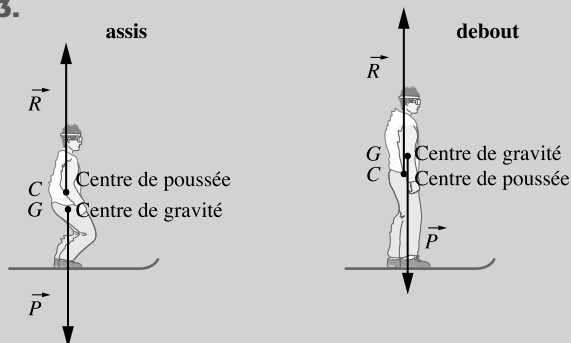
7. Dans un mélange en bonnes proportions, $\rho_{\text{œuf}} = \rho_{\text{mélange eau/eau salée}}$; le poids de l'œuf est égal au poids du même volume de liquide déplacé.

27. 1. 1. Le skysurfeur atteint une vitesse limite, car il est soumis à deux forces qui se compensent : son

poids vertical $\vec{P}$, vers le bas, et le frottement de l'air vertical $\vec{R}$, vers le haut.

2. Le centre de poussée est le centre de gravité du volume de fluide (air) déplacé.

3.



En position assise, lorsque le skieur s'incline vers l'avant, l'ensemble des deux forces $\vec{R}$ et $\vec{P}$ tend à le ramener dans sa position initiale : cette position est stable.

Au contraire, en position debout, lorsque le skieur s'incline vers l'avant, les forces $\vec{R}$ et $\vec{P}$ tendent à le faire basculer vers l'avant : cette position est instable.

II. 1. a. Le skieur ouvre son parachute au bout d'environ 52 secondes, date à laquelle sa vitesse décroît très fortement.

b. Il modifie sa position à la date 32 secondes environ. Sa vitesse est alors aussi modifiée.

2. Il y a trois paliers de vitesse :

– le premier à environ $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, vitesse atteinte en chute libre avant la réalisation d'une figure ; il ne doit pas être en position verticale, car sa vitesse n'est pas maximale ;

– le deuxième à $54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, vitesse atteinte à l'issue de sa figure avant ouverture du parachute ; il doit donc être en position verticale, il atteint alors une vitesse limite maximale ;

– le troisième à $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, vitesse limite atteinte avec son parachute.

3. Lorsque la vitesse est constante, le poids et la force de frottement de l'air se compensent, leurs valeurs sont égales.

4. Les vitesses des paliers diffèrent, car elles dépendent de la vitesse acquise par le skieur au moment où son poids et la résistance de l'air se compensent (cette vitesse dépend de la surface qui s'oppose à la descente du skieur, car la force de frottement dépend de la vitesse et de la forme du solide qui tombe).

2. Quelle relation vérifient-elles ?

3. Calculer, en fonction du volume V de l'iceberg, le volume V_1 de sa partie visible et le volume V_2 de sa partie immergée.

2. Étude expérimentale d'un ressort

Le ressort à spires non jointives étudié a une masse négligeable devant les masses marquées accrochées à son extrémité libre.

1. On suspend des masses croissantes à l'extrémité libre d'un ressort accroché à une potence et on mesure pour chaque expérience l'allongement du ressort. Les résultats sont reportés dans le tableau ci-dessous.

Masse suspendue	50 g	100 g	150 g	200 g	300 g
Allongement	9 mm	1,9 cm	3,0 cm	3,9 cm	6,1 cm

Calculer le poids P des masses accrochées en prenant pour la constante de pesanteur g , la valeur $9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2. a. Faire l'inventaire des forces s'exerçant sur la masse lorsqu'elle est immobile.

b. Que peut dire de la somme vectorielle de ces forces ? Justifier.

3. À l'aide d'un tableur, tracer le graphique $T = f(x)$ représentant la valeur de la tension T du ressort en fonction de son allongement x .

4. Modéliser la courbe obtenue par une fonction linéaire.

5. La constante de proportionnalité k est appelée constante de raideur du ressort. Dans quelle unité s'exprime-t-elle dans le système international ? Déterminer sa valeur.

3. Glissement sur un plan incliné

À la sortie du camion, un déménageur fait glisser un meuble sur un plan incliné faisant un angle $= 30^\circ$ avec l'horizontale. La vitesse du meuble, de masse 80 kg est constante. La force exercée par le déménageur est parallèle au plan incliné, dirigée vers le haut et de valeur 200 N .

1. Faire le bilan des forces qui s'exercent sur le meuble.

2. Quelle relation existe-t-il entre ces forces ?

3. Représenter ces forces sur un schéma.

4. En déduire la valeur de la résultante des forces de frottement.

Donnée : $g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

4. Test d'ARCHIMÈDE sur des œufs

Deux œufs dont les volumes respectifs ont été mesurés par déplacement d'eau $V_1 = 60 \text{ mL}$ et $V_2 = 57 \text{ mL}$ sont pesés pendant plusieurs jours. Les 9 premiers jours, les œufs sont stockés à température ambiante ($T = 20^\circ \text{C}$)

Du 10^e au 16^e jour, ils sont conservés au frais.

À partir du 16^e jour, ils sont à nouveau conservés à température ambiante.

Le 15^e jour, l'œuf 2 est fêlé. On constate le 28^e jour que l'œuf 2 flotte.

Exercices complémentaires

Énoncés

1. Utiliser le principe d'ARCHIMÈDE

Un iceberg est un bloc de glace de densité $0,92$ flottant sur l'eau de mer de densité $1,03$.

1. Nommer les résultantes des forces qui s'exercent sur l'iceberg.

Les résultats des pesées sont consignés dans le tableau suivant.

	19 oct	21 oct	22 oct	23 oct	24 oct	25 oct	27 oct
jour	1	3	4	5	6	7	9
œuf 1	64,66	64,34	64,22	63,98	63,81	63,72	63,4
œuf 2	62,81	62,44	62,31	61,98	61,72	61,58	61,23

	3 nov	4 nov	5 nov	8 nov	9 nov	15 nov
jour	16	17	18	21	22	28
œuf 1	63,13	63,02	62,99	62,6	62,46	61,19
œuf 2	60,72	60,49	60,12	59,36	58,89	56,36

- Représenter sur trois schémas les forces qui s'exercent sur un œuf immergé qui coule, qui flotte entre deux eaux, qui flotte en émergeant une partie (on rendra compte des intensités relatives des forces).
- Reporter les résultats dans un tableur et représenter graphiquement l'évolution de la masse des œufs en fonction du temps écoulé.
- Indiquer les relations qui permettent de calculer :
 - la masse volumique de chaque œuf;
 - la poussée d'ARCHIMÈDE qui s'exercerait sur chaque œuf s'il était totalement immergé dans de l'eau;
 - le poids de chaque œuf.
- Montrer qu'à température constante, l'évolution de la masse au cours du temps est une fonction affine.
- Évaluer graphiquement le jour où l'œuf 1 commencera à flotter.

Corrigés

1. 1. Sur l'iceberg s'exercent le poids $\vec{P}$ et la poussée d'ARCHIMÈDE $\vec{F}_A$.

2. À l'équilibre $P = F_A$, soit :

$$\begin{aligned}\rho_{\text{glace}} \cdot V \cdot g &= \rho_{\text{eau}} \cdot V_2 \cdot g \\ &= 0,92 \times 10^3 \times V \cdot g \\ &= 1,03 \times 10^3 \times V_2 \cdot g.\end{aligned}$$

3. $V_2 = V \times \frac{0,92}{1,03} = 0,893 V$, environ 90 % du volume

de l'iceberg est immergé;

$V_1 = V - V_2 = 0,107 V$, environ 10 % du volume de l'iceberg est émergé.

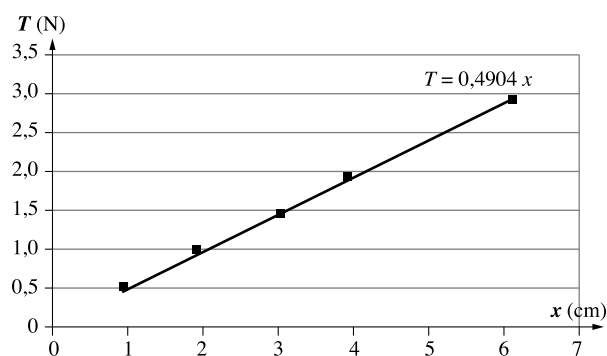
2. 1. Calcul du poids des masses :

Masse	50 g	100 g	150 g	200 g	300 g
Poids $P = m \cdot g$	0,49 N	0,98 N	1,47 N	1,96 N	2,94 N

2. a. Le système « masse suspendue » est soumis à son poids $\vec{P}$ et la tension $\vec{f}$ du ressort.

b. Le principe de l'inertie est applicable dans le référentiel terrestre. Lorsque le système est en équilibre : $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$, donc $P = T$.

3. et 4.



5. Le graphique $T = f(x)$ montre que T est fonction linéaire de x , soit T proportionnelle à x :

$$T = k \cdot x$$

avec k , une constante s'exprimant en $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ dans le système international.

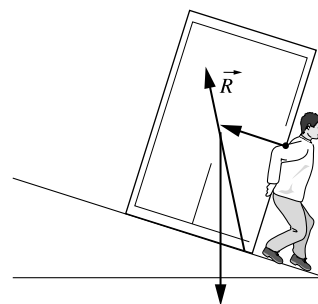
Ici $k = 49 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

3. 1. Le meuble est soumis à son poids $\vec{P}$, à la force $\vec{T}$ exercée par le déménageur et à la résultante $\vec{R}$ des forces exercées par le plan.

2. Le meuble glisse à vitesse constante, son mouvement est donc rectiligne uniforme :

$$\vec{F} + \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}.$$

3.



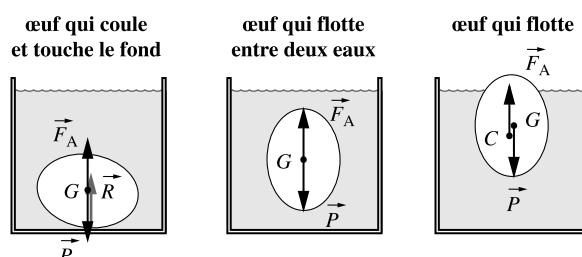
4. Les caractéristiques de $\vec{P}$ et $\vec{F}$ sont connues. En dessinant la somme vectorielle $\vec{F} + \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ on en déduit, graphiquement, la représentation de la résultante $\vec{R}$.

La résultante des forces de frottement est la composante $\vec{R}_T$ de $\vec{R}$ parallèle à la ligne de plus grande pente du plan. Selon cette ligne, le mouvement est uniforme :

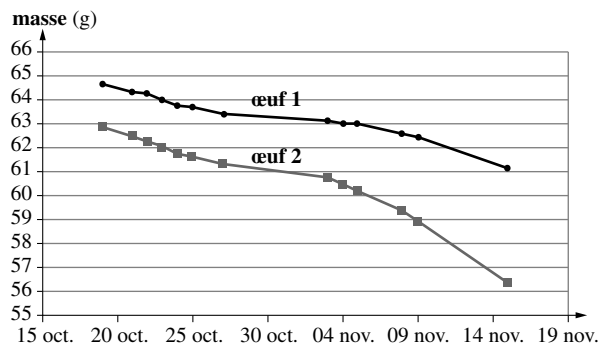
$$\vec{F} + \vec{P}_T + \vec{R}_T = \vec{0}, \text{ soit } R_T = P_T - F = P \cdot \sin \alpha - F.$$

$$R_T = 80 \times 10 \times \sin 30^\circ - 200 = 200 \text{ N}.$$

4. 1. Schémas des forces qui s'exercent sur l'œuf selon sa situation :



2. Évolution de la masse des œufs en fonction de la date :

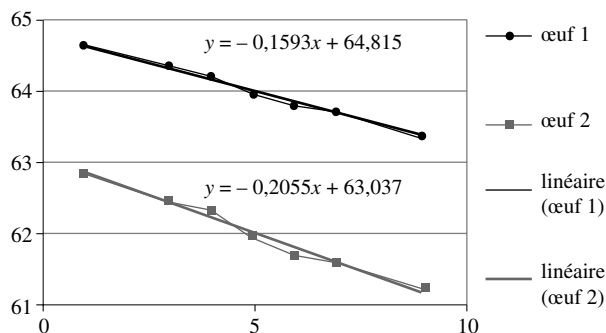


3. Relations permettant de calculer :

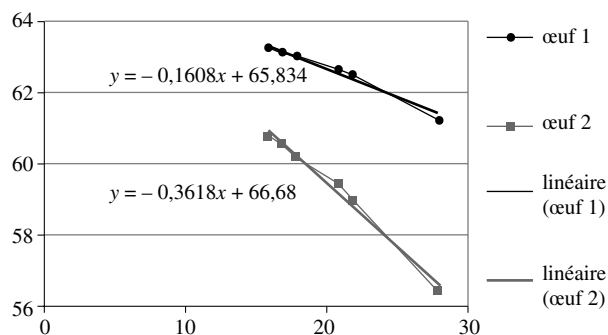
- la masse volumique $\rho : \frac{m}{V}$;
- le poids $P = m \cdot g$;
- la poussée d'ARCHIMÈDE $F_A = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot V$.

4. Modélisation de l'évolution de la masse au cours du temps :

Les 10 premiers jours : on a une évolution affine.

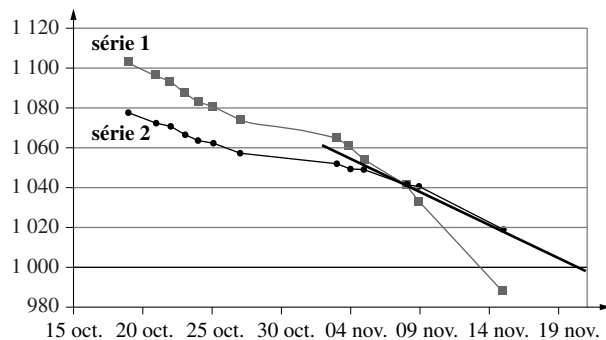


Du 17^e au 28^e jour (mêmes conditions de conservation que pour les 10 premiers jours), la perte de masse est plus importante pour l'œuf fêlé, car le gaz s'échappe plus aisément.



5. Évaluation graphique de la date à laquelle les œufs vont flotter

On trace l'évolution de la masse volumique (en $\text{kg} \cdot \text{m}^3$) en fonction de la date ; tant que cette masse volumique est supérieure à celle de l'eau ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$) l'œuf coule et quand elle est inférieure, il flotte.



Sur le graphique, on lit que l'œuf 1 flottera le 21 novembre, soit le 34^e jour, et l'œuf 2 le 13 novembre, soit le 26^e jour.

Compléments scientifiques

Frottements et mouvements

- C'est GALILÉE qui, constatant qu'une bille abandonnée à elle-même sur un plan horizontal finissait par s'arrêter, a introduit le premier l'idée de l'existence des forces de frottement.

Une force qui s'oppose à un mouvement est une **force de frottement** :

- si la force s'oppose à un mouvement effectif, on parle de **frottement cinétique** ;
- si la force s'oppose à la mise en mouvement d'un solide soumis à d'autres forces, on parle de **frottement statique**.

- L'origine des frottements est l'interaction électromagnétique qui s'exerce entre les molécules qui forment la matière (solide, liquide ou gazeuse).

« Le frottement liquide-gaz nous évite d'être bombardés par des gouttes de pluie de grande vitesse. Il permet au vent d'agiter la mer et retarde la montée des bulles dans un verre de bière.

Le frottement solide-liquide ralentit le flux de sang dans les vaisseaux et le pétrole dans les oléoducs. Il rend les balles inutiles sous l'eau et l'huile collante et dangereuse sur les autoroutes.

Le frottement des marées des océans contre le sol ralentit la rotation de la Terre, augmentant ainsi la longueur des journées. Le frottement solide-gaz entrave le flux de l'air dans les pompes, les tuyaux et les poumons. Il ralentit les patineurs, les cyclistes et les voitures (à 110 km/h une voiture consomme 70 % de son carburant pour vaincre la résistance de l'air). Il brûle complètement les météores, menace la rentrée d'un vaisseau spatial dans l'atmosphère et permet aux parachutistes d'atteindre le sol sains et saufs. Le frottement solide-solide permet de freiner une voiture et il dissipe environ 20 % de la puissance du moteur. Sans lui, vous ne pourriez ni marcher ni manger ni porter des habits.

Il permet de filer les tissus, les tapis et les cordes et il nous permet d'écrire avec des crayons et de feuilleter un livre. Le frottement est une grande force de la nature, à la fois nuisible et bienfaisante. »

Extrait de *Physique*, Eugène HECHT, De Boeck Université.

- La **force de frottement statique** peut être mesurée comme indiqué dans les T.P. En effet lorsqu'on exerce une force motrice sur un solide susceptible de se mouvoir, tant que le solide reste immobile, la force de frottement est égale à la force motrice.

Ainsi, la valeur de la force motrice exercée à l'instant de la mise en mouvement donne la valeur maximale de la force de frottement statique $f_{\max}$.

Léonard de VINCI avait déjà observé les trois propriétés de cette force de frottement statique maximale :

- la valeur du frottement statique $f_{\max}$ est indépendante de la valeur de la surface de contact entre les deux solides; ainsi elle est la même quelle que soit la face sur laquelle un parallélépipède repose sur un plan;
- $f_{\max}$ est proportionnelle à la force normale exercée par le support sur l'objet $f_{\max} = \mu_s \cdot N$ avec μ_s **coefficient de frottement statique**;
- le coefficient de frottement statique dépend de la nature des deux surfaces en contact.

Ces propriétés sont des lois empiriques approchées que les résultats expérimentaux confirment le plus souvent à mieux que 10 % près.

Les frottements statiques sont responsables des mouvements sur une surface solide (comme la marche ou le roulement).

- La **force de frottement cinétique** est la force de contact qui tend à ralentir un corps en mouvement; sa valeur f est égale à celle de la force motrice qui maintient le mobile à vitesse constante.

L'expérience montre que les trois règles précédentes restent valables dans le cas du frottement cinétique mais avec un coefficient différent, le **coefficient cinétique** μ_c , $f = \mu_c \cdot N$.

- **Exemples de valeurs de coefficients de frottement**

Matériaux en contact	μ_s	μ_c
acier / glace	0,1	0,05
acier / acier (sec)	0,6	0,4
acier / acier (lubrifié)	0,1	0,05
acier / téflon	0,04	0,04
bois / bois	0,5	0,3
glace / glace	0,07	0,02
verre / verre	0,9	0,4
cuir / tapis	0,6	0,5
cuir / bois	0,3	0,2
caoutchouc / bois	0,9	0,7
pneu / béton sec	1,0	0,7
pneu / béton verglacé	0,3	0,2
téflon / téflon	0,04	0,04

Compléments documentaires

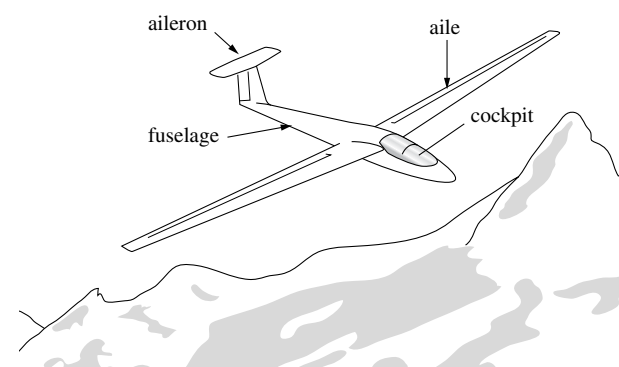
- Un article de *Science et Avenir*, n° 650, d'avril 2001, « Le temps du gecko », développe le document de l'activité préparatoire B du chapitre, au sujet des interactions qui expliquent les forces de contact microscopiques

entre les pattes de l'animal et les supports avec lesquels il est en contact.

- Le vol à voile (d'après un manuel d'initiation au vol à voile).

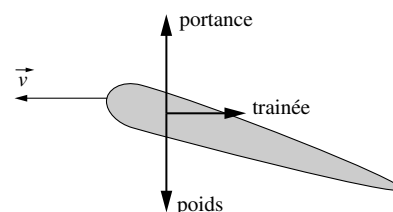
Comment le planeur vole-t-il ?

Description du planeur :



« Comme l'oiseau, le planeur est plus lourd que l'air. Pour qu'il vole, il faut faire apparaître une force capable de s'opposer à son propre poids. Cette force est obtenue par le déplacement relatif à l'air de la surface des ailes. » Ainsi, l'action de l'air sur l'ensemble du planeur se réduit à une résultante aérodynamique que l'on peut décomposer en deux forces :

- la portance, perpendiculaire au vent relatif;
- la traînée, opposée au mouvement (schéma. ci-dessous).

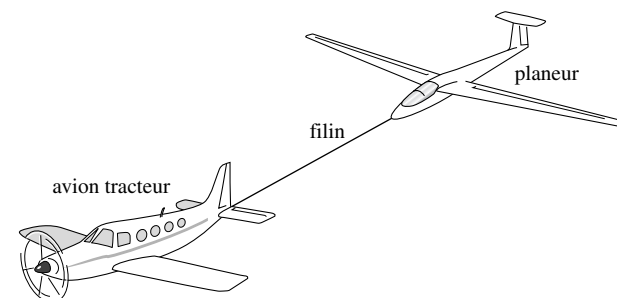


Pour voler, il faut :

- une surface de forme étudiée;
- un angle d'incidence adéquat;
- une vitesse suffisante par rapport à l'air.

Le vol horizontal remorqué

Le poids est compensé par la portance. La traînée est compensée par la traction du remorqueur (lorsque le remorqueur vole horizontalement et à vitesse constante).



Le vol plané en air calme

Que se passe-t-il si la force de traction disparaît ?

- la force de traînée fait diminuer la vitesse;
- la portance diminue;
- le planeur tombe!

« Sans force de traction, le vol horizontal d'un planeur est impossible... mais une trajectoire descendante permet de retrouver l'équilibre des deux forces. »

Pour être sur une trajectoire de vol stable (vitesse constante), un planeur doit avoir :

- une résultante aérodynamique égale et opposée au poids;
- une pente de trajectoire constamment descendante par rapport à l'air qui environne.

En outre, la force motrice du planeur est une composante de son poids; et plus la pente est forte, plus la force motrice est importante... et plus la vitesse est grande.

Bibliographie

Ouvrages

- Eugène HECHT, *Physique*, De Boeck Université.
- *Forces et mouvement*, Collection Passion des sciences, Gallimard.

Sites Internet

<http://www.palais-decouverte.fr/discip/physique/archim/>
<http://www.mcs.drexel.edu/~crrres/Archimedes/Crown/Vitruvius.html>

Les lois de NEWTON

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

II. Forces, travail et énergie

A. Forces et mouvement

3. Une approche des lois de NEWTON appliquées au centre d'inertie

Objectifs

L'idée est de reprendre et d'approfondir les notions vues en Seconde en montrant comment une action s'exerçant sur un solide est capable de modifier son mouvement.

L'un des objectifs est de préciser la conception newtonienne du mouvement selon laquelle la force est liée au changement de la vitesse et non à la vitesse.

Ce travail a déjà été entrepris en classe de Seconde avec une première approche du principe de l'inertie et de la force de gravitation.

Il s'agit maintenant de donner davantage de consistance au point de vue newtonien en étendant le champ de l'étude à celle de solides soumis à plusieurs actions simultanées, le cas du solide en translation étant privilégié. Le mouvement du centre d'inertie d'un solide est le principal objet de l'étude, mais pour autant il ne s'agit pas de présenter la mécanique du « point matériel » mais d'aborder celle de systèmes réels par celle du système matériel le plus simple, le solide.

Contenus

- 1^{re} loi : principe d'inertie, ce principe n'est vrai que dans certains référentiels. Ces référentiels sont dit galiléens.
- 2^e loi : aspect semi-quantitatif : comparaison de la somme des forces et de la variation du vecteur vitesse du centre d'inertie dans un référentiel galiléen.
- 3^e loi : principe des actions réciproques.

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Connaître et appliquer les lois de NEWTON :
 - Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie ne varie pas, la somme $\vec{F} = \Sigma \vec{f}$ des

forces qui s'exercent sur le solide est nulle et réciproquement.

– Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie varie, la somme $\vec{F} = \Sigma \vec{f}$ des forces qui s'exercent sur le solide n'est pas nulle. Sa direction et son sens sont ceux de la variation de $\vec{v}_G$ entre deux instants proches.

– A et B étant deux corps, soient $\vec{F}_{B/A}$ la force exercée par B sur A et $\vec{F}_{A/B}$ la force exercée par A sur B . Quel que soit l'état de mouvement de A par rapport à B , on a toujours l'égalité vectorielle : $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$.

- Analyser un exemple où une force de frottement sert à la propulsion.

Exemples d'activités

- Mettre en relation la variation du vecteur vitesse $\vec{v}_G$ d'un mobile avec la somme des forces appliquées dans des situations simples et variées.
- Expliquer pourquoi il y a des ceintures de sécurité dans les voitures.
- Analyser comment le principe d'inertie s'applique à un véhicule qui monte une côte rectiligne à vitesse constante.
- Expliquer le rôle des roues motrices et du sol dans le mouvement d'une voiture.

Commentaires

Une approche des lois de NEWTON

On se limite à un niveau de formulation semi-quantitatif des lois de NEWTON qu'on énoncera comme principes fondamentaux dans un référentiel galiléen. Valables pour tout corps même déformable, on se contentera ici de les appliquer à des solides.

La première loi permet de retrouver le principe d'inertie. Pour son application, le référentiel terrestre et le référentiel géocentrique seront considérés comme galiléens.

L'approche quantitative de la deuxième loi s'appuie sur le constat d'une variation $\Delta \vec{v}_G$ de la vitesse du centre d'inertie calculée entre deux instants proches. La relation $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ sera vue en classe Terminale; seuls la direction et le sens des vecteurs $\vec{F}$ et $\Delta \vec{v}_G$ seront comparés en classe de Première (cas où la somme des forces est nulle, cas d'un mouvement rectiligne varié, cas d'un mouvement curviligne varié, cas d'un mouvement circulaire uniforme).

Pour la troisième loi, on dit que deux corps A et B sont en interaction si l'état de mouvement ou de repos de l'un (A) dépend de l'existence de l'autre (B). Une interaction entre deux corps A et B suppose toujours deux actions réciproques : celle de A sur B et celle de B sur A . Une expression plus complète de la troisième loi doit prendre en compte les moments des forces ; cela ne sera pas abordé ici. De plus, on évitera l'emploi de l'expression « loi de l'action et de la réaction » qui peut induire l'idée fautive d'une « réaction » causée par une « action » et lui faisant suite temporellement.

Il est intéressant de faire remarquer aux élèves que la résultante des forces de frottements s'exerçant sur un mobile peut être dirigée dans le sens opposé à la vitesse du mobile (freinage), mais aussi dans le même sens (propulsion).

On se limite dans ce programme au mouvement du centre d'inertie ; dans l'application des deux premières lois à ce point, pour effectuer la somme des forces, les vecteurs qui les décrivent seront représentés graphiquement à partir d'une origine commune. Ce point peut être le centre d'inertie ou de préférence un point en dehors de la figure représentant le dispositif étudié.

Matériel

Cours

➤ Activité 1

Une table pour l'enregistrement des positions de différents points de la semelle d'un mobile autoporteur. On peut utiliser une table à digitaliser connectée à un ordinateur.

➤ Activité 2

Un chariot pour poser une table d'enregistrement des positions du centre de la semelle d'un mobile autoporteur. On peut utiliser une table à digitaliser connectée à un ordinateur.

➤ Activité 3

– Un fil élastique (ou ressort) et une table d'enregistrement des positions du centre de la semelle d'un mobile autoporteur. On peut utiliser une table à digitaliser connectée à un ordinateur.

– Une petite cuve transparente contenant une solution de chlorophylle dans l'alcool.

➤ Expérience du document 11, paragraphe 3

Deux dynamomètres.

Rechercher et expérimenter

Une caméra vidéo ou une webcam et le matériel informatique approprié.

Déroulement du chapitre

➤ Objectifs

- Connaître et appliquer les trois lois de NEWTON.
- Analyser un exemple où une force de frottement sert à la propulsion.

Ces objectifs affichés en page d'introduction sont un raccourci des « connaissances et savoir-faire exigibles » du programme officiel.

➤ Prérequis

- Savoir représenter une force.
- Connaître l'effet d'une force sur le mouvement et savoir que cet effet dépend de la masse de l'objet.
- Savoir énoncer et appliquer le principe de l'inertie.

Voir les *prérequis*, page 28 du manuel.

La transition entre les notions introduites en classe de Seconde et les notions à introduire en classe de Première n'est pas simple.

D'après le programme officiel de Seconde, les élèves ont appris, entre autres, que :

« – pour un observateur terrestre, tout corps persévère en son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les forces qui s'exercent sur lui se compensent ;

– une force s'exerçant sur un corps modifie la valeur de la vitesse et/ou la direction de son mouvement et que cette modification dépend de la masse du corps ».

Dans le chapitre précédent, nous avons dû déjà utiliser la réciproque du principe de l'inertie (non évoquée dans le programme de Seconde) pour répondre aux exigences du programme de Première, à savoir :

« – identifier et représenter les actions qui s'exercent sur un solide ;

– utiliser le principe d'inertie pour analyser les forces qui agissent sur un solide, en mouvement ou non. »

Il nous faut donc maintenant, entre autres :

– introduire la notion de référentiel galiléen ; le référentiel terrestre est galiléen pour l'étude de certains mouvements seulement ;

– préciser ce que l'on entend par « mouvement d'un solide » ;

– introduire le statut particulier du centre d'inertie G ;

– préciser, autant qu'il se peut, ce que sont des « forces qui se compensent ».

Activités préparatoires

A. Trajet en bus

Le dessin illustre, par une situation de la vie courante, le principe de l'inertie.

Le bus freine, le mouvement du passager perdure. Il est évidemment exclu d'évoquer, à ce niveau, une « force d'inertie » qui propulserait le voyageur vers l'avant du bus.

Réponses aux questions

1. Si le bus freine, le passager continue son mouvement vers l'avant.
2. Si le bus accélère, le passager, conservant la vitesse initiale du bus, est projeté vers l'arrière de celui-ci.
3. Si le bus tourne brusquement à droite, le passager continuant en ligne droite par rapport au sol est projeté vers la gauche du bus.

B. Danse, gymnastique et jonglage...

La photographie illustre deux phases du mouvement d'une massue de GRS.

Réponses aux questions

1. Pendant la phase de lancement, la massue est soumise à son poids, à la force exercée par la main de la

gymnaste, ainsi qu'à l'action de l'air de valeur négligeable.

2. En l'air, la massue est soumise à son poids et à l'action de l'air.

C. Le sokatira

Le document illustre le principe des interactions.

On peut poser une autre question : « la force exercée par la corde sur les mains d'un équipier de l'équipe perdante est-elle supérieure à la force exercée par les mains de cet équipier sur la corde ? ».

A priori, les élèves répondront par l'affirmative. Il faudra y revenir après avoir vu le principe des interactions. On fera faire une analyse de la situation : le système est la corde ; elle est soumise, à une extrémité, à la force $\vec{F}_{A/corde}$ exercée par l'équipe A et à l'autre extrémité, à la force $\vec{F}_{B/corde}$ exercée par l'équipe B (on néglige le poids de la corde).

L'équipe B est gagnante si $F_{B/corde} > F_{A/corde}$. On a toujours $\vec{F}_{A/corde} = -\vec{F}_{corde/A}$ et $\vec{F}_{B/corde} = -\vec{F}_{corde/B}$ en vertu du principe des interactions.

Réponses aux questions

1. Les forces exercées par les mains d'un sportif sur la corde sont des forces de contact, forces de frottement.
2. Les forces exercées par la corde sur les mains d'un sportif sont des forces de contact, forces de frottement.

Cours

1. Une force est-elle nécessaire pour qu'un mouvement perdure ?

Dans un premier temps, nous restons dans le référentiel terrestre, nous substituons à l'expression « forces qui se compensent » l'écriture $\vec{F} = \Sigma \vec{f} = \vec{0}$. Parlons d'abord de « mouvement du solide » en précisant « mouvement de translation » pour nous intéresser ensuite au mouvement du centre d'inertie G.

Nous exploitons un texte de NEWTON pour reprendre l'énoncé du principe de l'inertie et de sa réciproque :

« Dans un référentiel terrestre :

– si la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur un solide est nulle, il reste dans son état de repos ou en mouvement rectiligne et uniforme ;

– réciproquement, si un solide reste dans son état de repos ou est animé d'un mouvement rectiligne et uniforme, la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur ce solide est nulle. »

Il convient de bien écrire « il reste dans son état de repos ou de mouvement (sous-entendu de translation) rectiligne et uniforme » et non pas « il est au repos ou en mouvement de translation rectiligne et uniforme ». Si l'on veut insister, on pourrait énoncer : « si un solide est au repos lorsqu'il est soumis à un ensemble de forces de somme nulle, il reste au repos ; s'il est en mouvement de translation rectiligne et uniforme, il conserve ce mouvement. »

En effet, un solide soumis à un ensemble de forces de somme vectorielle nulle n'est pas forcément au repos ou en mouvement de translation rectiligne et uniforme. Un solide soumis à un couple n'est ni au repos, ni en mouvement de translation rectiligne et uniforme.

Avec la seule condition $\vec{F} = \Sigma \vec{f} = \vec{0}$, c'est le centre d'inertie G du solide qui reste dans son état de repos ou en mouvement rectiligne et uniforme. Le solide peut avoir alors un mouvement propre autour de G. Le solide n'est pas « au repos » ou son mouvement n'est pas un mouvement de translation rectiligne et uniforme.

Pour que le solide reste au repos ou en mouvement de translation rectiligne et uniforme, une condition sur les moments des forces est, elle aussi, nécessaire (torseur nul), mais elle ne peut pas être évoquée en classe de Première.

Concernant la réciproque, il n'y a pas de problème : si un solide reste dans un état de repos ou est animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme, on a bien $\vec{F} = \Sigma \vec{f} = \vec{0}$ (et une autre condition, que l'on peut ne pas évoquer en classe de Première).

Pour ne pas alourdir, nous nous sommes abstenus d'énoncer le « *a contrario* » du premier principe, à savoir :

« Dans un référentiel terrestre, si la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur un solide n'est pas nulle, il ne reste pas dans son état de repos ou en mouvement rectiligne et uniforme. »

Nous précisons alors que : « Le principe d'inertie, ainsi énoncé, est applicable à un solide en mouvement de translation. »

En effet, nous avons vu que parler « du mouvement d'un solide » n'a de signification que si ce solide est en translation.

1.1 Application du principe d'inertie à un solide en mouvement quelconque

Dans le chapitre précédent, nous avons fait « découvrir », comme le préconise le programme, que le mouvement du centre d'inertie G est souvent plus simple que les mouvements des autres points du solide. Cela nous incite à comparer les mouvements du centre d'inertie G et d'un point quelconque d'un solide lorsqu'il est animé d'un mouvement de translation, puis d'un mouvement quelconque. On découvre le statut particulier de G dont le mouvement correspond au « mouvement d'ensemble » du solide (par opposition au mouvement propre, par rapport à G). Ces notions de « mouvement d'ensemble » et « mouvement propre » ne sont pas préconisées par le programme et ne sont donc pas introduites dans notre ouvrage.

Lorsque le mobile, soumis aux deux forces $\vec{P}$ et $\vec{R}$ est animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme, $\vec{P}$ et $\vec{R}$ « se compensent » et, entre autres, $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

On pourrait ici préciser : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ et ces forces ont la même droite d'action.

Nous faisons admettre que lorsque le mobile est animé d'un mouvement quelconque on a encore $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ et les forces ont la même droite d'action.

On conclut en admettant que : *lorsqu'un solide est animé d'un mouvement quelconque, le principe d'inertie ne peut s'appliquer qu'à son centre d'inertie G.*

> Activité 1

Réponses aux questions

1. Les mouvements des points A et B sont enregistrés dans le référentiel terrestre.

2. Les forces appliquées au mobile lors de ces mouvements sont le poids $\vec{P}$ et la réaction $\vec{R}$.

3. Le mouvement de translation est rectiligne et uniforme. Le principe d'inertie permet d'écrire :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}.$$

4. Pour l'enregistrement du document 3 a (translation rectiligne et uniforme), le mouvement du centre d'inertie G est rectiligne et uniforme. Pour l'enregistrement du document 3 b (mouvement quelconque), le mouvement du centre d'inertie G est encore rectiligne et uniforme.

1.2 Référentiels d'application du principe d'inertie

Nous proposons de montrer que, les forces appliquées se compensant, le mouvement de G n'est pas toujours rectiligne et uniforme : le référentiel est en cause. On conclut : « Le principe de l'inertie ne s'applique pas dans tous les référentiels. On appelle référentiel galiléen, un référentiel dans lequel le principe d'inertie est vérifié. »

Nous citons et décrivons sommairement les référentiels héliocentrique et géocentrique.

On aboutit aux énoncés :

Dans un référentiel galiléen, si la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur un solide est nulle, le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ de son centre d'inertie G ne varie pas.

Réciproquement, dans un référentiel galiléen, si le vecteur $\vec{v}_G$ du centre d'inertie d'un solide ne varie pas, la somme $\vec{F}$ (appelée aussi résultante) des forces qui s'exercent sur ce solide est nulle.

➤ Activité 2

Réponses aux questions

1. L'enregistrement est effectué dans le référentiel du chariot.

2. Les forces appliquées au mobile sont les mêmes que dans l'activité 1 : elles se compensent toujours.

3. Dans le référentiel du chariot, le mouvement du centre d'inertie du mobile n'est pas rectiligne uniforme.

2. Que se passe-t-il lorsque les forces appliquées au solide ne se compensent pas ?

Le mobile évoluant sans frottement sur un support horizontal est maintenant soumis à une troisième force $\vec{T}$ horizontale exercée par un fil élastique. On fait admettre que $\vec{P}$ et $\vec{T}$ « se compensent » toujours. On fait comparer les directions et sens des vecteurs $\vec{F} = \vec{T}$ et $\Delta\vec{v}_G$ pour aboutir à :

Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie d'un solide varie, la somme (ou résultante) $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur le solide n'est pas nulle.

La direction et le sens de la résultante des forces $\vec{F}$, à un instant donné, sont ceux de la variation $\Delta\vec{v}_G$ du vecteur vitesse à cet instant.

➤ Activité 3

Réponses aux questions

Les réponses sont données dans le manuel, page 76, et la méthode est précisée dans la rubrique *Aborder les difficultés du chapitre*, page 82.

3. Quelle loi régit les interactions entre deux corps ?

La notion d'interaction est introduite en analysant une situation de la vie courante : l'interaction sol-semelle lors de la marche.

Il est possible de l'illustrer en présentant deux aimants droits posés sur des rouleaux et dont les pôles se repoussent (expérience classique) : l'aimant A agit sur l'aimant B et réciproquement. Si l'aimant A est maintenu immobile, seul l'aimant B est mis en mouvement ; seule l'action de A sur B est observable, mais cela n'exclut pas que B agisse sur A . Lors d'une interaction, l'effet de l'action de l'un des protagonistes sur l'autre n'est pas toujours observable, mais elle existe.

On peut aussi relier les aimants à des dynamomètres et les mettre en position telles qu'ils s'attirent. En admettant que l'un des dynamomètres mesure la valeur de la force exercée par A sur B , et l'autre celle de la force exercée par B sur A , on compare ces valeurs. L'expérience est plus intéressante si l'un des aimants est plus gros que l'autre, car on pourrait s'attendre à ce qu'il exerce une force plus grande.

On affirme la troisième loi de NEWTON :

Si un corps A exerce sur un corps B une action mécanique modélisée par la force $\vec{F}_{A/B}$, alors B exerce sur A une action mécanique modélisée par la force $\vec{F}_{B/A}$.

Que les corps A et B soient au repos ou en mouvement, les forces d'interaction ont la même droite d'action et $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$.

On analyse ensuite des situations où des forces de frottement servent à la propulsion.

Remarquons ici que la force de propulsion exercée par le sol sur la roue motrice d'une moto ne travaille pas (roulement sans glissement), car son point d'application a une vitesse nulle dans le référentiel terrestre. Nous retrouverons ce problème lorsqu'il s'agira d'appliquer le théorème de l'énergie cinétique à une moto. Par exemple, sur une route horizontale le véhicule est soumis à son poids (travail nul), aux composantes verticales de l'action du sol (travail nul), à la force de propulsion horizontale exercée par le sol sur la roue motrice (travail nul), à la force opposée au mouvement exercée par le sol sur la roue non motrice (travail nul), aux forces de « résistance » de l'air, seules forces extérieures appliquées au véhicule fournissant un travail. Nous devons considérer, en fait, un système déformable (et non un solide) ; le théorème de l'énergie cinétique implique les travaux des forces extérieures et les travaux des forces intérieures (approche totalement hors programme).

Il paraît donc exclu de faire rechercher la valeur de « la force motrice » qui anime une moto en appliquant le théorème de l'énergie cinétique. En fait, la force motrice est la force extérieure hypothétique qui fournirait un travail égal à la somme des travaux des forces intérieures ; elle ne peut se traduire par « action exercée par... sur le véhicule ». Cette force extérieure hypothétique peut d'ailleurs être résistante lorsque le véhicule use du « frein moteur ».

Rechercher et expérimenter

1. Évolution des théories sur les mouvements

Réponses aux questions

1. « Une vitesse quelconque imprimée à un corps se conserve rigoureusement aussi longtemps que les causes extérieures d'accélération ou de ralentissement sont écartées. »

Un corps conserve son mouvement de translation rectiligne et uniforme si les forces qui lui sont appliquées se compensent.

Dans un référentiel galiléen, si la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur un solide est nulle, le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ de son centre d'inertie G ne varie pas.

2. ARISTOTE estime qu'un corps ne peut rester animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme que s'il est soumis à une force non compensée qui entretient ce mouvement. Ceci est d'ailleurs en accord avec les observations de la vie courante où une force motrice est nécessaire pour compenser les forces de frottement. GALILÉE et NEWTON émettent l'hypothèse qu'un corps qui ne serait soumis à aucune force (pas de frottement) conserverait son mouvement de translation rectiligne et uniforme.

3. GALILÉE évoque le principe de l'inertie (cas où les forces se compensent), NEWTON évoque le cas où les forces ne se compensent pas et relie la modification de la vitesse du corps à la résultante non nulle des forces appliquées.

2. La deuxième loi de NEWTON

Réponses aux questions

1. Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie d'un solide varie, la somme (ou résultante) $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur le solide n'est pas nulle. La direction et le sens de la résultante des forces $\vec{F}$, à un instant donné, sont ceux de la variation $\Delta\vec{v}_G$ du vecteur vitesse à cet instant.

2. La balle de golf est soumise à son poids et à la résistance de l'air dont la valeur est négligeable par rapport à celle du poids.

3. et 4. $\Delta\vec{v}_G$ est vertical descendant comme le poids de la balle, ce qui est conforme à la deuxième loi de NEWTON.

Aborder les difficultés du chapitre

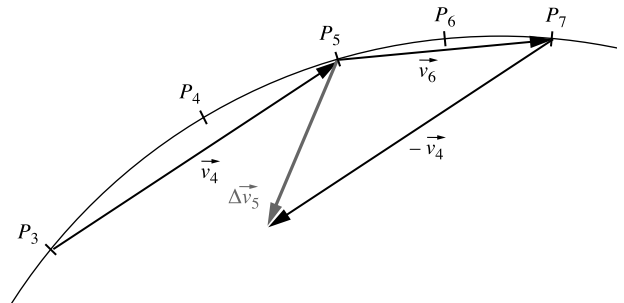
Comment déterminer la variation du vecteur vitesse en un point d'une trajectoire ?

Nous guidons, pas à pas, l'élève pour apprendre à tracer un vecteur variation des vecteurs vitesse entre deux positions proches encadrant une position donnée.

Une méthode efficace peut ensuite être proposée (selon le niveau de la classe). Il s'agit de faire représenter le vecteur vitesse $\vec{v}_4$ en P_4 , par exemple, par le vecteur déplacement $\vec{P}_3\vec{P}_5$ et le vecteur vitesse $\vec{v}_6$ par le vecteur $\vec{P}_5\vec{P}_7$.

$v_4 = \frac{P_3P_5}{2\tau} = \frac{4,8 \times 10^{-2}}{80 \times 10^{-3}} = 0,60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; le vecteur $\vec{v}_4$ étant représenté par le segment fléché $\vec{P}_3\vec{P}_5$ de longueur 4,8 cm, on a l'échelle : $\frac{4,8}{0,60} = 8 \text{ cm pour } 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit $0,125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour 1 cm.

Au vecteur $\vec{v}_6$ on ajoute le vecteur $-\vec{v}_4$, et l'on obtient le vecteur $\Delta\vec{v}_5$ dont l'origine est alors en P_5 .



Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. 1. Proposition c. : le palet est soumis à un ensemble de forces dont la résultante est nulle.

2. Proposition a. : le mouvement du centre d'inertie du palet est toujours rectiligne et uniforme, quel que soit le mode de lancement.

2. 1. Les vecteurs $\Delta\vec{v}$ sont dirigés vers le centre de la trajectoire circulaire (ils sont centripètes).

2. La deuxième loi de NEWTON précise que les vecteurs $\Delta\vec{v}$ et $\vec{F}$, résultante des forces appliquées au palet, ont même direction et sens. $\vec{F}$ est donc aussi centripète.

3. La charge est soumise à son poids $\vec{P}$ et à la force $\vec{T}$ exercée par le filin.

a. Le mouvement du centre d'inertie est rectiligne et uniforme : $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$ et $P = T$.

b. $T > P$.

c. $T < P$.

4. 1. a. $\vec{F}_1$: force exercée par le sol sur la semelle du marcheur.

b. $\vec{F}_2$: force exercée par le sol sur la roue de la caravane; $\vec{F}_3$: force exercée par la caravane sur l'automobile; $\vec{F}_4$: force exercée par le pneu de la roue motrice de la voiture sur le sol.

c. F_5 : force exercée par le ballon sur la main du gardien de but.

2. La deuxième force, pour chacune des interactions, est directement opposée à la force représentée.

5. 1. L'action d'une roue motrice sur le sol, lors du démarrage, peut être modélisée par une force orientée vers le bas et vers l'arrière de la moto. La composante parallèle au sol de cette force agit vers l'arrière et peut propulser des gravillons.

2. La force qui permet à la moto d'avancer est la composante parallèle au sol de la force exercée par le sol sur le pneu de la roue motrice.

Exercices

1. 1. Dans un référentiel galiléen si la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur un solide est nulle, le vecteur vitesse de son centre d'inertie $\vec{v}_G$ est constant.

Réciproquement, dans un référentiel galiléen, si le vecteur $\vec{v}_G$ du centre d'inertie d'un solide ne varie pas, la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur ce solide est nulle.

2. Un référentiel dans lequel s'applique le principe de l'inertie est un référentiel galiléen. Le référentiel terrestre et le référentiel géocentrique sont des référentiels galiléens.

2. 1. Le centre d'inertie G du solide est concerné par cette loi.

2. Elle n'est valable que dans un référentiel galiléen.

3. Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie d'un solide varie, la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur le solide n'est pas nulle. La direction et le sens de la résultante $\vec{F}$ des forces sont ceux de la variation $\Delta\vec{v}_G$ du vecteur vitesse $\vec{v}_G$ entre deux instants proches.

3. a. Faux : un solide en mouvement soumis à des forces qui se compensent peut avoir un mouvement quelconque, son centre d'inertie ayant un mouvement rectiligne et uniforme.

b. Faux : quand les forces extérieures appliquées au solide ne se compensent pas, le vecteur vitesse du centre d'inertie est modifié. Le vecteur vitesse peut être modifié en direction et sens tout en conservant la même valeur (mouvement circulaire uniforme, par exemple).

c. Vrai.

d. Faux : quand la résultante des forces appliquées à un solide n'est pas nulle, le vecteur variation du vecteur vitesse du centre d'inertie est colinéaire à cette résultante.

e. Vrai.

4. 1. $\vec{F}_1$: force exercée par la main de Bertrand sur la corde ; $\vec{F}_2$: force exercée par la corde sur la main d'Antoine.

$\vec{F}_3$: force exercée par le soulier de Bertrand sur le sol ;

$\vec{F}_4$: force exercée par le sol sur le soulier d'Antoine.

2. Les deux forces modélisant une interaction sont des forces directement opposées (même droite d'action).

4. Principe de interactions : $\vec{F}_{C/B} = -\vec{F}_{B/C}$ que les objets B et C soient au repos ou en mouvement ; les valeurs sont donc les mêmes.

5. 1. Le mouvement de G est rectiligne uniforme dans le référentiel terrestre. La résultante des forces appliquées au palet est nulle d'après le premier principe.

2. a. Le palet est soumis à son poids et à la réaction du support.

b. Schéma (voir doc. 4, page 73).

6. 1. Le mouvement du centre d'inertie de la clef à molette est rectiligne et uniforme dans le référentiel

terrestre. D'après la première loi de NEWTON, la résultante des forces appliquées à l'objet est nulle (les forces se compensent).

2. La clef a pu être lancée sur une table à coussin d'air horizontale et chronophotographiée

7. 1. Le mouvement de C est rectiligne et uniforme ; le mouvement de A est curviligne varié.

2. C situé sur la verticale passant par G a un mouvement identique à G .

3. Si l'on secoue la table, le mouvement est modifié : le référentiel de la table n'est plus galiléen ; bien que le palet soit encore soumis à des forces qui se compensent, son centre d'inertie n'est plus animé d'un mouvement rectiligne et uniforme.

8. 1. a. La valise est soumise à son poids $\vec{P}$ et à la réaction $\vec{R}$ de la marche sur laquelle elle est posée.

b. et **c.** La valise est animée d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme : les forces appliquées se compensent et $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$. La force $\vec{P}$ est verticale descendante, $\vec{R}$ verticale ascendante. $\vec{P}$ est appliqué au centre de gravité G de la valise, $\vec{R}$ appliquée en un point du dessous de la valise situé sur la verticale passant par G .

$$R = P = m \cdot g = 140 \text{ N.}$$

2. a. Les forces appliquées à la valise ne sont pas modifiées.

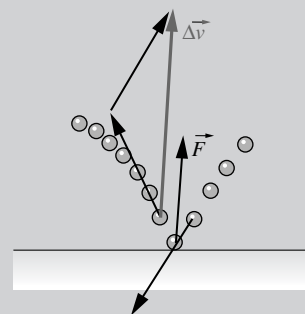
b. La valise est soumise à des forces qui se compensent et est au repos par rapport à l'escalier : le principe de l'inertie est vérifié, le référentiel « escalier » est donc galiléen.

9. La résultante $\vec{F}$ des forces est de même direction et de même sens que $\Delta\vec{v}_G$: les cas (a) et (d) conviennent.

10. 1. Il s'agit du véhicule vert : en effet, $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$ et $\vec{F}$ ont la même direction et le même sens.

2. On donne à $\vec{F}$ la direction et le sens de la différence $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$.

11. 1., 2. et 3. Voir schéma.



4. La résultante des forces est de même direction et de même sens que $\Delta\vec{v}_G$, donc perpendiculaire à la paroi pratiquement.

5. Le poids $\vec{P}$, la poussée d'ARCHIMÈDE $\vec{F}_A$ due à l'air, l'action $\vec{R}$ du sol sur la balle :

$$P = 0,54 \text{ N ;}$$

$$F_A = 137 \times 10^{-6} \times 1,3 \times 10 = 1,8 \times 10^{-3} \text{ N.}$$

La poussée d'ARCHIMÈDE est négligeable devant le poids.

La résultante $\vec{F} = \vec{P} + \vec{R}$ est pratiquement verticale ascendante comme $\Delta\vec{v}_G$. La valeur de $\vec{R}$ est donc supérieure à celle de $\vec{P}$.

12. 1. Les vecteurs $\Delta\vec{v}_G$ en P_2 et en P_3 n'ont pas la même direction.

2. a. Pour une position donnée, la résultante $\vec{F}$ des forces appliquées à la bille a même direction et même sens que la variation $\Delta\vec{v}_G$ du vecteur vitesse du centre d'inertie.

Pour chaque position, on obtient un $\Delta\vec{v}_G$ différent : la résultante n'est donc pas constante. Elle est nulle en P_1 .

b. $\vec{F}$ est la résultante du poids de la bille, de la réaction du support et de la force exercée par l'aimant.

13. 1. a. Interaction sol-pneu de la roue motrice ; interaction sol-semelle du marcheur ; interaction voiture-caravane.

b. Force exercée par le sol sur le pneu et force exercée par le pneu sur le sol ; force exercée par le sol sur le pied et force exercée par le pied sur le sol ; force exercée par la voiture sur la caravane et force exercée par la caravane sur la voiture.

c. Pour chaque interaction $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$.

2. C'est effectivement l'action du macadam qui propulse la moto, mais, pour ce faire, il faut que la roue motrice soit mise en rotation et agisse sur le sol. La mise en rotation de la roue est assurée par le système de transmission (chaîne, courroie...), lui-même animé par le moteur de l'engin.

3. Les élèves ont tort : la force exercée par la voiture sur la caravane et la force exercée par la caravane sur la voiture ont toujours la même valeur (troisième loi de NEWTON).

14. 1. a. Juste avant que le banc ne cède, il est soumis à l'action de contact exercée par la caisse, de résultante $\vec{F}_{C/B}$, à son poids et à l'action exercée par le sol de résultante $\vec{F}_{S/B}$. Ce sont ces deux forces qui comprimant le banc peuvent en provoquer l'effondrement.

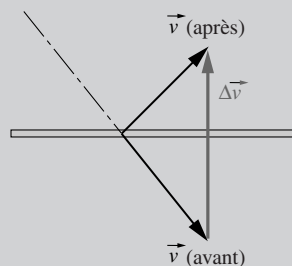
b. Non, le poids de la caisse agit sur la caisse, pas sur le banc.

2. Juste avant que le banc ne cède, la caisse est soumise à son poids $\vec{P}$ et à l'action de contact exercée par le banc $\vec{F}_{B/C}$. La caisse est momentanément en équilibre et $\vec{P} + \vec{F}_{B/C} = \vec{0}$, soit $P = F_{B/C}$.

3. Concernant l'interaction caisse – banc, la troisième loi de NEWTON donne :

$$\vec{F}_{C/B} = -\vec{F}_{B/C}, \text{ soit } F_{C/B} = F_{B/C} = P.$$

4. Ce n'est effectivement pas le poids de la caisse qui agit et brise le banc, mais la force $\vec{F}_{C/B}$ exercée par la caisse sur le banc. Cependant, dans ce cas, cette force a même valeur que le poids de la caisse.



15. 1. a. Entre A et B , le mobile est soumis à son poids $\vec{P}$ et à l'action de contact $\vec{R}$ exercée par la glace. En l'absence de frottement, $\vec{R}$ est perpendiculaire à la pente. La somme $\vec{P} + \vec{R}$ n'est pas nulle : le vecteur vitesse du mobile varie.

$\vec{R}$ n'intervient pas dans le mouvement. En revanche, le poids a un composante parallèle à la pente qui est une force motrice ; elle accélère la luge vers le bas.

2. Entre C et D , le poids et la réaction se compensent et le mouvement du mobile est un mouvement de translation rectiligne et uniforme.

Entre D et E , le poids n'intervient plus dans le mouvement. La force de frottement dirigée en sens contraire du mouvement freine la luge : le mouvement de translation est décéléré.

16. 1. a. La balle est soumise à trois forces :

- son poids $\vec{P}$ vertical descendant de valeur $P = m \cdot g$;
- la poussée d'ARCHIMÈDE $\vec{F}_A$ due à l'air ;
- les forces de viscosité ou forces de frottement dues à l'air, de résultante $\vec{F}_f$.

$$\mathbf{b.} \quad P = m \cdot g = 2,3 \times 10^{-2} \text{ N.}$$

$$F_A = \rho_{\text{air}} \cdot V \cdot g = 1,3 \times 4 \times \pi \times (1,9 \times 10^{-3})^3 \times \frac{10}{3} = 3,7 \times 10^{-7} \text{ N.}$$

La poussée d'ARCHIMÈDE est négligeable devant le poids $\frac{F}{P} = 1,6 \times 10^{-5}$.

2. a. La valeur v de la vitesse et la valeur de la variation du vecteur vitesse s'expriment en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. La valeur de la vitesse de la balle augmente ; donc la courbe 2 représente v .

c. La valeur de la vitesse augmente pour atteindre une vitesse limite à l'instant 1,9 s environ. En effet, à cette date $\Delta v = 0$.

La variation de v est importante au départ, puis diminue à mesure que v augmente et enfin s'annule lorsque v est constante.

3. a. Le poids est constant, donc Δv est constant.

b. Il existe donc une autre force que le poids, la force de résistance de l'air qui varie au cours de la descente et qui s'oppose au mouvement. La résultante diminue pour s'annuler puisque Δv diminue. Donc la force de résistance augmente avec v .

c. La balle atteint la vitesse limite lorsque la force de résistance de l'air compense le poids.

17. 1. a. Tant qu'elle est dans les mains de la gymnaste, la massue est soumise à son poids, à la force exercée par les mains et à l'action de l'air de valeur négligeable.

b. La résultante des forces appliquées à la massue est verticale ascendante.

c. La massue est projetée vers le haut : la valeur de la force exercée par les mains est supérieure à celle du poids de la massue.

2. a. Une fois lâchée, la massue n'est plus soumise qu'à son poids et à l'action de l'air, de valeur négligeable.

b. Quand la massue s'élève, le vecteur vitesse de son centre d'inertie est vertical ascendant alors que la

résultante des forces qui lui sont appliquées est verticale descendante : la résultante des forces et le vecteur vitesse du centre d'inertie ont la même direction verticale. Lorsqu'elle retombe, la résultante des forces et le vecteur vitesse ont la même direction et le même sens.

c. Lors de la montée ou lors de la descente $\Delta \vec{v}_G$ est vertical descendant comme $\vec{P}$.

18. 1. Le mobile est soumis à son poids $\vec{P}$, vertical descendant, et à l'action $\vec{R}$ du support, verticale ascendante en l'absence de frottement.

$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$: la résultante des forces appliquées est nulle lors des différents lancers.

2. a. Si le camion est immobile, le référentiel de la table support est galiléen. Le mouvement du centre d'inertie du mobile soumis à des forces qui se compensent est rectiligne et uniforme : il s'agit de l'enregistrement (c).

b. Le camion freine durant le mouvement du mobile qui lui garde une vitesse constante par rapport au sol. Le référentiel du support étant ralenti, le mobile va plus vite par rapport au support : *document* (a).

c. Le camion tourne durant le mouvement du mobile qui, lui, va en ligne droite à vitesse constante par rapport au sol. Le référentiel du support tourne à gauche et le mobile tourne à droite par rapport au support : *document* (d).

3. Le référentiel du camion est galiléen lorsque celui-ci est immobile ou animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport au sol.

19. 1. a. Le système A (Antoine et le bâton) est soumis à son poids $\vec{P} = \vec{P}_{\text{Terre/A}}$ (vertical descendant), à la force $\vec{R}_1 = \vec{R}_{\text{plafond/A}}$ (verticale descendante) exercée par le plafond sur le bâton et à la force $\vec{R}_2 = \vec{R}_{\text{pèse-personne/A}}$ (verticale ascendante) exercée par le pèse-personne.

c. Le pèse-personne donne une indication correspondant à la valeur de la force qui appuie sur son plateau, soit $\vec{R}'_2 = \vec{R}_{\text{A/pèse-personne}}$ exercée par le système (pieds d'Antoine) sur le pèse-personne.

2. a. Le système A est en équilibre : $\vec{P} + \vec{R}_1 + \vec{R}_2 = \vec{0}$; $R_2 = P + R_1$.

D'après le principe des interactions : $R_2 = R'_2$.

La valeur R'_2 ($R'_2 = P + R_1$) de la force qui agit sur le plateau du pèse-personne est supérieure à la valeur P du poids d'Antoine.

b. $R_2 = R'_2 = 92 \times 9,8 = 9,0 \times 10^1$ N.

$P = 78 \times 9,8 = 7,6 \times 10^1$ N ;

$R_1 = R_2 - P = 1,4 \times 10^1$ N.

20. 1. a. Dans le premier équilibre, le système est soumis à son poids $\vec{P}$ vertical descendant et à la réaction $\vec{R}_1$ du plateau verticale ascendante.

b. Dans le second équilibre, le système est soumis à son poids $\vec{P}$ vertical descendant, à la réaction $\vec{R}_2$ du plateau verticale ascendante et à la force $\vec{F}$ verticale descendante modélisant l'action du solide S immergé sur l'eau.

2. C'est la force $\vec{F}'$ exercée par le fond du bécquet sur le plateau de la balance qui donne à celle-ci une inclinaison plus ou moins grande.

Dans les deux cas, le système est en équilibre.

Premier cas : $\vec{P} + \vec{R}_1 = \vec{0}$ (première loi de NEWTON) et $\vec{R}_1 = -\vec{F}'_1$ (troisième loi de NEWTON), soit $F'_1 = P$.

Second cas : $\vec{P} + \vec{R}_2 + \vec{F} = \vec{0}$ (première loi de NEWTON) et $\vec{R}_2 = -\vec{F}'_2$ (troisième loi de NEWTON), soit $F'_2 = P + F$.

Dans le second cas, la force verticale descendante qui agit sur le plateau est plus grande que dans le premier cas ($F'_2 = F'_1 + F$) et la masse du système posé sur le plateau paraît plus grande.

3. Le dynamomètre mesure la force exercée par le solide S sur son crochet de valeur égale à celle de la force $\vec{T}$ exercée par le crochet sur le solide S (interaction).

Avant immersion, S, en équilibre, est soumis à son poids $\vec{P}_S$ et à la force $\vec{T}_1$ exercée par le crochet du dynamomètre : $T_1 = P_S$.

Après immersion, S, en équilibre, est soumis à son poids $\vec{P}_S$, à la poussée d'ARCHIMÈDE $\vec{F}_A$ et à la force $\vec{T}_2$ exercée par le crochet du dynamomètre : $T_2 = P_S - F_A$.

La différence d'indication du dynamomètre correspond donc à la valeur de la poussée d'ARCHIMÈDE sur le solide S.

La force $\vec{F}$ verticale descendante modélisant l'action de S sur l'eau est directement opposée à l'action de l'eau sur S : $F = F_A$.

Dans le second cas, la force verticale descendante qui agit sur le plateau vaut $F'_2 = P + F_A$.

L'augmentation apparente du poids de l'objet posé sur le plateau correspond donc à la valeur de la poussée d'ARCHIMÈDE.

À la diminution du poids décelée par le dynamomètre correspond une augmentation de poids décelée par la balance, variation de valeur égale à celle de la poussée d'ARCHIMÈDE sur le solide S immergé.

21. 1. a. La bille est soumise à son poids $\vec{P}$ vertical descendant, à l'action de l'huile (poussée d'ARCHIMÈDE $\vec{F}_A$ verticale ascendante) et aux forces de frottement $\vec{F}$ opposées au mouvement.

c. Le vecteur vitesse reste vertical descendant et sa valeur augmente progressivement pour atteindre éventuellement une valeur limite.

2. a. Initialement $F = 0$ et la résultante $\vec{R}$ des forces appliquées vaut $R = P - F_A$.

$P = m \cdot g = \rho_v \cdot V \cdot g = 2,6 \times \frac{4}{3} \times \pi \times 0,5^3 \times 10^{-3} \times 9,8 = 1,3 \times 10^{-2}$ N ;

$F_A = \rho_h \cdot V \cdot g = 0,97 \times \frac{4}{3} \times \pi \times 0,5^3 \times 10^{-3} \times 9,8 = 5,0 \times 10^{-3}$ N.

La somme des forces appliquées à la bille n'est pas nulle, le poids a une valeur supérieure à celle de la poussée d'ARCHIMÈDE : le mouvement de la bille est accéléré vers le bas.

b. Lorsque v est différent de zéro :

$R = P - F_A - F = (\rho_v - \rho_h) \cdot V \cdot g - 0,115 \cdot v = 8,0 \times 10^{-3} - 0,115 \cdot v$.

Lorsque $R = 0$, d'après le principe d'inertie, le mouve-

ment est rectiligne et uniforme. La vitesse limite atteinte est alors $v = 7,0 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. Le mouvement est rectiligne et uniforme.

3. Voir le graphique d'évolution de la vitesse de l'exercice 16, page 86 du manuel.

22. 1. Phase 1 : l'élastique est tendu et rapproche les mobiles.

Phase 2 : l'élastique est mou et n'agit plus sur les mobiles : les mouvements des centres d'inertie sont rectilignes et uniformes.

Phase 3 : c'est la rencontre des mobiles qui se repoussent.

Phase 4 : l'élastique est mou et n'agit pas sur les mobiles : les mouvements des centres d'inertie sont rectilignes et uniformes.

Phase 5 : l'élastique est tendu, il retient, puis rapproche les mobiles.

2. a. Les variations $\Delta \vec{v}_{G_1}$ et $\Delta \vec{v}_{G_2}$ des vecteurs vitesse des centres d'inertie G_1 et G_2 des mobiles (1) et (2) sont quasiment portées par la droite $(G_1 G_2)$.

b. Chaque mobile est soumis à son poids vertical descendant, à la réaction du support qui en l'absence de frottements est perpendiculaire au support et compense le poids et à la force de contact exercée par l'autre mobile.

c. Les forces $\vec{F}_{1/2}$ et $\vec{F}_{2/1}$ sont respectivement les résultantes des forces appliquées aux mobiles (1) et (2).

Les directions et sens des forces $\vec{F}_{1/2}$ et $\vec{F}_{2/1}$ sont ceux des $\Delta \vec{v}_{G_1}$ et $\Delta \vec{v}_{G_2}$.

d. $\vec{F}_{1/2} = -\vec{F}_{2/1}$ et $F_{1/2} = F_{2/1}$.

e. Le vecteur représentant $\Delta \vec{v}_{G_1}$ a une longueur quasiment double de celui représentant $\Delta \vec{v}_{G_2}$.

$$\Delta \vec{v}_{G_1} \approx 2 \Delta \vec{v}_{G_2}$$

Les deux mobiles sont soumis à des forces de même valeur, mais le mobile (2) subit une plus faible variation de vitesse que le mobile (1) : le mobile (2) a une masse supérieure à celle du mobile (1).

3. a. En A_8 et B_8 , les variations $\Delta \vec{v}_{G_1}$ et $\Delta \vec{v}_{G_2}$ des vecteurs vitesse des centres d'inertie G_1 et G_2 des mobiles (1) et (2) ont pratiquement la direction $(A_8 B_8)$.

b. $\Delta \vec{v}_{G_1} \approx 2 \Delta \vec{v}_{G_2}$.

c. Chaque mobile est soumis à son poids vertical descendant, à la réaction du support qui en l'absence de frottements est perpendiculaire au support et compense le poids, et à la force exercée par l'élastique tendu (E), soient $\vec{F}_{E/1}$ et $\vec{F}_{E/2}$.

Les forces $\vec{F}_{E/1}$ et $\vec{F}_{E/2}$ sont respectivement les résultantes des forces appliquées aux mobiles (1) et (2) et leurs directions et sens sont ceux des $\Delta \vec{v}_{G_1}$ et $\Delta \vec{v}_{G_2}$.

La force exercée par l'une ou l'autre des extrémités de l'élastique tendu possède la même valeur $\vec{F}_{E/1} = \vec{F}_{E/2}$.

d. Les deux mobiles sont soumis à des forces de même valeur, mais le mobile (2) subit une plus faible variation de vitesse que le mobile (1) : le mobile (2) a une masse supérieure à celle du mobile (1).

23. A. 1. La Lune est le satellite naturel de la Terre. Les satellites placés par l'Homme sont dits « artificiels ».

2. Une période de révolution correspond à la durée d'un tour sur la trajectoire.

3. L'orbite est la trajectoire du satellite.

4. Le méridien de Greenwich est la ligne imaginaire joignant, à la surface du globe terrestre, les pôles Nord et Sud. C'est aussi le plan contenant cette ligne.

$$5. \sin x = \frac{R_T}{(R_T + h)} = \frac{6340}{(6340 + 35800)}$$

$x = 8,7^\circ$. L'angle sous lequel le satellite « voit » la Terre est $2x = 17,3^\circ \approx 17^\circ$.

$R = R_T \cdot \cos x = 6270 \text{ km}$ et non 6063 km .

6. Les zones de « hautes latitudes » sont situées à proximité des pôles. On ne peut voir les zones polaires : elles sont situées hors du « disque MÉTÉOSAT ».

B. 1. Dans le référentiel terrestre, un satellite géostationnaire est immobile. Le texte indique :

« La position d'un satellite géostationnaire paraît fixe aux yeux d'un observateur terrestre, ... »

2. Le référentiel géocentrique est lié au centre de la Terre et peut être représenté par trois axes dirigés vers trois étoiles lointaines et passant par le centre de la Terre.

Dans ce référentiel, le mouvement d'un satellite géostationnaire est un mouvement circulaire uniforme, dont le centre est celui de la Terre et dont la trajectoire est contenue dans le plan équatorial.

3. La vitesse angulaire de rotation du satellite est constante ainsi que la valeur de sa vitesse. Le vecteur vitesse n'est pas constant : il change d'orientation au cours du mouvement.

4. La durée d'un tour est 23 h 56 min, soit 86 160 s pour décrire un angle de 2π :

$$\omega = \frac{2\pi}{86160} = 7,2925 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. $v = (R_T + h) \cdot \omega = (6340 + 35800) \times 7,2925 \times 10^{-5}$;
 $v = 3,073 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

6. Les vecteurs vitesse sont tangents à la trajectoire en chaque position.

7. La force qui s'exerce sur le satellite est la force gravitationnelle :

$$F = \frac{G \cdot M_T \cdot m_s}{(R_T + h)^2}$$

Avec $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ et $m_s = 316 \text{ kg}$: $F = 71,0 \text{ N}$. Les vecteurs forces sont centripètes.

8. Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie d'un solide varie, la somme $\vec{F}$ des forces qui s'exercent sur le solide n'est pas nulle.

La direction et le sens de la résultante des forces $\vec{F}$, à un instant donné, sont ceux de la variation $\vec{v}_G$ du vecteur vitesse à cet instant.

9. Le vecteur variation $\vec{v}_2 - \vec{v}_0$ appliqué en S_1 est centripète comme la force appliquée.

10. Non, car le vecteur variation du vecteur vitesse ne serait plus centripète comme la force appliquée.

11. Si un objet A exerce sur un objet B une action mécanique modélisée par la force $\vec{F}_{A/B}$ alors B exerce sur A une action mécanique modélisée par la force $\vec{F}_{B/A}$. Que les corps A et B soient au repos ou en mouve-

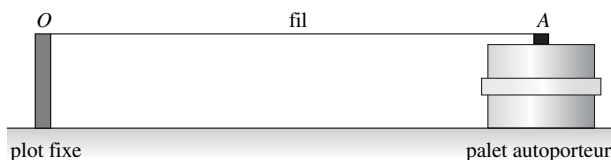
ment, les forces $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ modélisant l'interaction ont la même droite d'action et : $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$.

La Terre exerce une force gravitationnelle sur le satellite et le satellite exerce une force gravitationnelle sur la Terre, mais cette dernière est sans effet observable.

Exercice d'évaluation

Énoncé

Un palet autoporteur est relié à un plot fixé au milieu de la table horizontale par un fil inextensible et de masse très faible, comme indiqué sur la figure ci-dessous.



Le fil comporte, à chaque extrémité, un anneau en matière plastique, de masse très faible, s'emboîtant, avec un jeu minime sur un axe vertical, l'un en O, l'autre en A; les frottements entre chaque anneau et son axe sont sans effet sur le glissement de l'un sur l'autre.

La longueur entre les anneaux est $L = OA = 20 \text{ cm}$; le diamètre du palet est $D = 9,2 \text{ cm}$.

1. Une impulsion, orientée vers l'arrière du plan de la figure, est donnée au mobile autoporteur.

a. Qu'est-ce qu'un mobile autoporteur? Quel est l'intérêt de ce dispositif?

b. Quel est l'effet de l'impulsion donnée à ce mobile?

2. On enregistre les positions successives de l'axe du palet grâce à un dispositif produisant des étincelles à intervalles de temps égaux à une base de temps $t = 40 \text{ ms}$. On constate que la mesure V de la vitesse du point axial est constante et telle que $V = 0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

a. Représenter la trajectoire du point axial à l'échelle 1/2.

b. Placer les positions enregistrées sur une durée $\Delta t = 0,040 \text{ s}$.

c. Représenter les vecteurs vitesse instantanée à un instant t et à l'instant $t + 2\tau$.

d. Dessiner le vecteur $\Delta \vec{V}$, variation du vecteur vitesse du point axial entre les instants t et $t + 2\tau$.

3. On s'intéresse aux forces influençant le mouvement.

a. Effectuer l'inventaire des forces extérieures agissant sur le palet autoporteur.

b. Déterminer la résultante de ces forces.

c. En déduire la direction et le sens du vecteur $\Delta \vec{V}_G$ variation du vecteur vitesse instantanée du centre d'inertie du palet. Justifier en énonçant la loi de la mécanique utilisée.

d. Pourquoi l'étude effectuée sur l'enregistrement est-elle conforme à cette prévision?

4. Le mobile étant parvenu dans la dernière position, le fil casse.

a. Effectuer l'inventaire des forces agissant sur le mobile dès la cassure du fil.

b. En déduire :

– la trajectoire du centre d'inertie du mobile;

– la trajectoire du point axial;

– la vitesse du point axial.

Justifier les réponses et si nécessaire énoncer les lois de la mécanique utilisées.

c. Représenter les positions enregistrées pendant 0,20 s après la cassure du fil.

Corrigé

1. a. Un mobile autoporteur est un solide muni d'un générateur autonome d'air pulsé créant un coussin d'air entre la semelle du mobile et la surface de la table d'expérimentation.

L'intérêt du coussin d'air est de réduire considérablement les frottements.

b. L'effet de l'impulsion donnée au palet est de lui communiquer une vitesse initiale; comme l'axe du mobile est astreint à rester à une distance fixe de l'axe du plot, le point axial du palet va décrire une trajectoire circulaire.

2. a. Représentation de la trajectoire à l'échelle 1/2.

Le rayon de la trajectoire représentée est :

$$r = 20 : 2 = 10 \text{ cm}.$$

b. Le mouvement est circulaire et uniforme :

$$V = \ell / \Delta t; \ell = V \cdot \Delta t, \text{ avec } V = 50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Les positions enregistrées sont situées sur le cercle trajectoire et distantes de :

$$d \approx \ell = 50 \times 0,040 = 2,0 \text{ cm ou } 20 \text{ mm, en assimilant l'arc de cercle et sa corde.}$$

Sur le dessin, $d' = d \times 0,5 = 10 \text{ mm}$.

c. Le vecteur vitesse instantanée $\vec{v}(t)$ est tangent à la trajectoire au point correspondant à l'instant t , orienté dans le sens du mouvement; son origine coïncide avec la position à cet instant; sa longueur est proportionnelle à la valeur de la vitesse instantanée ($v = V = 0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

d. Le vecteur $\Delta \vec{V}$, variation du vecteur vitesse entre les dates t et $t + 2\tau$, est construit avec pour origine, la position à la date intermédiaire $t + \tau$; il est tel que :

$$\vec{V}(t + 2\tau) = \vec{V}(t) + \Delta \vec{V}.$$

3. a. Les forces extérieures agissant sur le palet autoporteur sont :

– son poids $\vec{P}$;

– la résultante des forces de sustentation dues au coussin d'air; force de contact sans frottement : $\vec{R}_N$; elle est orthogonale à la surface de contact, plane et horizontale;

– la traction du fil : $\vec{T}$; elle est colinéaire au fil et orientée vers le point d'attache central, fixe dans le référentiel de la table.

b. La résultante de ces forces est confondue avec la traction du fil, car le poids est exactement compensé par la résultante des forces de sustentation (ces forces ont des droites d'action verticales; la traction du fil est dans le plan horizontal) :

$$\vec{P} + \vec{R}_N + \vec{T} = \vec{0} + \vec{T}.$$

D'après la 2^e loi de NEWTON, le vecteur a la même direction et le même sens que la résultante des forces extérieures agissant sur le solide :

$$\Delta \vec{V}_G = k \cdot \vec{T} \text{ avec } k > 0;$$

alors, le vecteur $\Delta\vec{V}_G$ est dirigé à chaque instant selon un rayon du cercle trajectoire et orienté vers le centre de ce cercle.

d. L'étude effectuée sur l'enregistrement est conforme à cette prévision parce que :

- le mouvement du point axial est le même que celui du centre d'inertie G situé sur l'axe du mobile;
- le vecteur $\Delta\vec{V}$ construit est bien radial et central (ou centripète).

4. a. Dès la cassure du fil, les forces extérieures se ramènent au poids et à la force compensatrice de sustentation ; on a vu que leur résultante est nulle.

b. • D'après la 1^{re} loi de NEWTON, le centre d'inertie G du mobile persévère dans son mouvement rectiligne et uniforme avec la vitesse $\vec{V}_G$ qu'il avait à l'instant de la cassure :

G poursuit son chemin selon la tangente à son cercle – trajectoire au point atteint à l'instant de la cassure (il prend la tangente).

- Le point axial se comporte comme le centre d'inertie G ; il décrit un cercle – trajectoire dans le plan de la feuille d'enregistrement.

- La vitesse du point axial a pour valeur

$$V = 0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

(comme G , il conserve sa vitesse initiale).

c. Les positions, enregistrées, pendant les 200 ms suivant la cassure sont équidistantes de 20 mm, soit 10 mm sur la représentation graphique.

Bibliographie

Ouvrages

- NEWTON, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, traduction de M^{me} du CHÂTELET, J. Gabay, 1989.
- GALILÉE, *Discours sur deux sciences nouvelles*, traduction de M. CLAVELIN, Armand Colin, 1970.
- EINSTEIN et INFELD, *L'évolution des idées en physique*, Payot, 1955.
- BRÉBEC et al., *Mécanique 1 et 2*, Hachette Sup, Paris, 1999.
- BALIBAR, *Galilée et Newton lus par Einstein*, PUF, 1984.

Sites internet

<http://www.ac-nancy-metz.fr>

<http://www.ac-poitiers.fr>

<http://www.palais-decouverte.fr>

Travail mécanique et puissance

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

II. Forces, travail et énergie

B. Travail mécanique et énergie

1. Travail d'une force

Contenus

1. Travail d'une force

1.1 Notion de travail d'une force

Effets possibles d'une force dont le point d'application se déplace.

1.2. Travail d'une force constante

$$W = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \alpha.$$

Unité de travail : le joule (symbole : J). Expression du travail du poids d'un corps. Travail moteur, travail résistant.

1.3 Puissance du travail d'une ou plusieurs forces

Connaissances et savoir-faire exigibles

On attend qu'un élève :

- connaisse quelques effets, sur un solide, de forces dont le point d'application se déplace ;
- exprime et calcule le travail d'une force constante ;
- sache que le travail d'une force constante effectué entre deux points A et B est indépendant du chemin parcouru ;
- utilise la relation $\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t}$.

Exemples d'activités

Identifier les effets sur un solide de forces dont les points d'application se déplacent dans le référentiel d'étude :

- modifications de la valeur de la vitesse d'un solide en chute libre, d'un solide glissant sur un plan incliné, de la valeur de la vitesse de rotation d'un solide autour d'un axe fixe ;
- modifications de l'altitude, de la température, de l'aspect, etc.

Commentaires

Partant d'exemples concrets de la vie quotidienne, on constate que des objets soumis à une force dont le point d'application se déplace peuvent :

- être mis en mouvement (chariot, wagon, brique glissant sur une table, etc.) ;
- changer d'altitude (bagage que l'on monte à l'étage) ;
- voir leur température s'élever ;
- se déformer temporairement ou définitivement.

Dans tous les cas, on dira que la force travaille. On définit le travail W_{AB} d'une force constante F pour un déplacement AB de son point d'application par la relation : $W_{AB} = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$.

Pour un solide en translation, tous les points du solide ont même déplacement : le travail des forces réparties est alors identique à celui de leur résultante.

Les forces de pesanteur (champ localement uniforme) sont équivalentes à une force unique appliquée au centre d'inertie. Les altitudes z étant mesurées sur un axe (Oz) vertical dirigé vers le haut, on montrera que leur travail sur un solide s'exprime par $W_{AB} = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$ lorsque le centre d'inertie passe de l'altitude z_A à l'altitude z_B et qu'il est indépendant du chemin suivi.

Matériel

Pour chaque groupe d'élèves :

- Des diapositives ou des transparents illustratifs permettant d'introduire la réflexion sur le thème d'étude : tracteur tirant un outil ou une charge, bulldozer poussant un rocher, grue soulevant une charge, notice de moto et/ou d'automobile, etc.
- Un transparent et/ou une photocopie d'un texte historique d'introduction sur la notion de travail.
- Outil informatique et connexion à l'Internet pour un travail d'approfondissement individualisé.

Pour le professeur :

- Un banc à cousin d'air avec le mobile muni d'une voile (carton rectangulaire).
- Un sèche-cheveux.

> Objectifs

- Savoir dans quelles conditions une force fournit du travail.
- Exprimer et calculer le travail d'une force constante.
- Savoir que le travail d'une force constante est indépendant du chemin parcouru.
- Utiliser la relation $\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t}$.

Activités préparatoires

A. Le mystère de la construction des pyramides

Cette activité a pour objectif de montrer l'intérêt du plan incliné (pour obtenir le même travail, la force que l'on doit exercer est plus faible, mais le déplacement est plus long) et l'influence des forces de frottement.

Réponses aux questions

1. L'intérêt d'avoir la pente la plus faible possible est de diminuer la force à exercer sur le bloc pour le déplacer.
2. $H = L \cdot \sin \alpha$.

Pour H donné, L augmente si α diminue.

3. Les rampes étaient enduites de boues pour diminuer les forces de frottement.

B. Une des premières unités de puissance : le cheval-vapeur

Réponses aux questions

1. Les grandeurs physiques qui influent sur la puissance sont la force, le déplacement et le temps.
2. Le cheval-vapeur (ch) n'est pas une unité légale de puissance.
3. Le cheval fiscal indiqué sur les cartes grises n'est pas une unité de puissance.

Remarque : lorsqu'on parle de puissance d'une voiture ou d'un moteur, on commet un abus de langage ; en toute rigueur, on devrait parler de puissance d'une force. Dans le cas particulier d'un moteur à explosion, il s'agit de la puissance du couple moteur.

Cours

En physique, travail et puissance correspondent à des définitions mathématiques. Toutefois, nous avons abordé ces notions à partir d'expériences préliminaires afin de ne pas trop mathématiser ce chapitre.

1. Dans quels cas une force travaille-t-elle ?

Ce paragraphe introduit la notion de travail à partir des effets d'une force sur le mouvement d'un objet. On fait remarquer que le travail d'une force est déconnecté de la notion physiologique de fatigue que peut ressentir un individu.

On fera retenir qu'une force qui s'exerce sur un solide travaille lorsque la valeur de la vitesse est modifiée (la mise en mouvement entre dans cette définition, car la valeur de la vitesse passe alors de la valeur 0 à une valeur non nulle). Le professeur remarquera que cette défini-

tion est compatible avec le théorème de l'énergie cinétique qui sera présenté dans le chapitre suivant.

La modification de la direction du vecteur vitesse n'implique pas un travail de la force : on sait en effet que la force centripète, dans un mouvement circulaire uniforme, ne travaille pas, alors qu'elle modifie le mouvement en « tordant » la trajectoire. Il est faux de dire qu'une force travaille lorsqu'elle modifie le mouvement.

> Activité 1

Réponses aux questions

1. Une force exercée par la soufflerie sur le mobile peut le mettre en mouvement, modifier la valeur de la vitesse ou n'avoir pas d'effet sur la valeur de la vitesse si le courant d'air a lieu perpendiculairement au rail.
2. On maintient le sèche-cheveux à la même distance du mobile pour exercer une force constante sur le mobile.
3. La mise en mouvement ou la modification de la valeur de la vitesse dépend de la direction et du sens du courant d'air. Cet effet est très visible si le courant d'air est parallèle au rail.

2. Comment définir le travail d'une force constante ?

2.1 Paramètres intervenant dans l'expression du travail

Ces paramètres sont découverts à partir d'un dispositif expérimental, celui de l'activité précédente.

> Activité 2

Réponse à la question

Parmi les relations proposées pour le travail W effectué par une force constante, la relation $W = F \cdot \ell \cdot \cos \alpha$ est celle qui paraît le mieux convenir.

L'effet de la force est nul lorsque $\alpha = 90^\circ$, ($\cos 90^\circ = 0$) ; il est maximal lorsque $\alpha = 0^\circ$ ($\cos 0^\circ = 1$) et d'autant plus important que les valeurs de ℓ et F sont grandes.

2.2 Définition du travail

Insister sur le fait que ceci est une définition, que l'on définit le travail d'une force et que l'expression n'est valable que dans le cas d'une force constante.

Insister aussi sur le fait que l'unité de travail est celle de l'énergie : travail et énergie seront donc liés.

Ce résultat met en évidence que le travail d'une force constante ne dépend pas du chemin suivi : ce sera donc le cas du travail du poids d'un corps.

L'exercice d'entraînement 2 est une simple application numérique.

2.3 Travail moteur, travail résistant

On met l'accent sur l'algébrisation de la formule donnant le travail : un travail peut être négatif, positif ou nul. Un rappel de la fonction cosinus peut être nécessaire à partir du cercle trigonométrique.

L'exercice d'entraînement 3 permet de faire une synthèse.

3. Quelle est la particularité du travail du poids d'un objet ?

Le travail du poids est un cas particulier très important qui mérite un paragraphe.

L'élève retient en général la relation $W = m \cdot g \cdot h$ si le corps descend, $W = -m \cdot g \cdot h$ si le corps s'élève.

Toutefois, il est utile de faire remarquer que la relation $W = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$ sera opérationnelle par la suite et que cette relation est valable lorsque l'axe (Oz) est orienté vers le haut.

4. Comment définir la puissance d'une force ?

On insistera sur la distinction entre puissance moyenne et puissance instantanée ainsi que sur l'unité de puissance.

L'exercice d'entraînement 5 fait le lien avec le quotidien où l'on parle encore de cheval-vapeur.

Rechercher et expérimenter

1. Un saut de 40 000 mètres pour établir un nouveau record mondial !

Réponses aux questions

1. a. Le terme « chute libre » n'est pas bien adapté à ce saut, car un objet en chute libre n'est soumis qu'à son poids : ici il y a aussi des forces de frottement.

b. La combinaison est pressurisée, car en début de chute la pression atmosphérique est très faible.

2. a. Le système constitué par le parachutiste et son équipement subit une force d'attraction gravitationnelle de la part de la Terre donnée par : $F = G \cdot \frac{M_T \cdot m}{(R_T + h)^2}$.

$$b. g = G \cdot \frac{M_T}{(R_T + h)^2}.$$

Pour $h = 40\,000$ m, $g = 9,69$ N · kg⁻¹.

Au sol, $h = 0$ et $g = 9,81$ N · kg⁻¹.

c. $P = m \cdot g$. Comme g varie très peu (1 %), on peut considérer que le poids ne varie pratiquement pas au cours de la chute.

3. D'après le schéma, au bout de 30 s la hauteur de chute est de 5 000 m et la vitesse de 1 063 km/h, soit 295 m · s⁻¹.

La relation $v^2 = 2 g \cdot h$ donne $v = 313$ m · s⁻¹ en accord avec l'indication du schéma.

4. Le travail du poids, égal à $W = m \cdot g \cdot h$ vaut environ 38×10^6 J.

La puissance moyenne du poids est $\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t}$.

Avec $t = 6$ min 25 s = 325 s, $\mathcal{P} = 120$ kW.

2. Modéliser une chute libre

Réponses aux questions

1. La bille est animée d'un mouvement rectiligne, accéléré.

2. La vitesse de la bille augmente au cours du temps.

3. Ceci est en accord avec la deuxième loi de NEWTON : le poids, seule force appliquée à la bille est responsable de cette augmentation de vitesse.

4. Le graphique $W = f(v^2)$ correspond à la représentation d'une fonction linéaire. $W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$.

$$5. W = m \cdot g \cdot h.$$

$$6. \frac{1}{2} m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h; \text{ d'où } v^2 = 2 \cdot g \cdot h.$$

7. La relation n'est plus valable par la suite, car les frottements deviennent de plus en plus importants : le sauteur est soumis à une autre force que son poids.

Aborder les difficultés du chapitre

Nous indiquons deux méthodes pour calculer un produit scalaire :

– à partir du cosinus de l'angle entre les deux vecteurs ;

– à partir du projeté d'un vecteur sur la direction de l'autre vecteur.

Nous mettons aussi l'accent sur les relations entre les angles qui interviennent lorsqu'on étudie le mouvement d'un solide sur un plan incliné.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. 1. a. Le sauteur est soumis à son poids.

b. La vitesse et l'énergie cinétique du sauteur augmentent.

c. Le poids travaille, car son point d'application, G , se déplace dans une direction non perpendiculaire à celle de cette force.

2. a. Le sauteur est soumis à son poids et à la force exercée par l'élastique tendu.

b. De 25 m à 30 m, le mouvement a lieu vers le bas. Le travail de cette dernière force est négatif et l'énergie cinétique, donc la vitesse, diminue. Cette diminution est d'autant plus importante que l'allongement de l'élastique est important. Lorsque la valeur de cette force est supérieure à la valeur du poids, la vitesse diminue rapidement, s'annule, puis change de sens : le sauteur remonte.

Le sauteur remonte : c'est maintenant le travail du poids qui est négatif et qui est à l'origine de la diminution de l'énergie cinétique et donc de la vitesse.

c. Ces forces travaillent, car leurs points d'application se déplacent dans des directions non perpendiculaires à celles de ces forces.

$$2. 1. W = F \cdot \ell \cdot \cos \beta.$$

$$2. W = 300 \times 22,5 \times \cos 20^\circ = 6,34 \times 10^3 \text{ J}.$$

$$3. 1. a. W_{AB} = -P \cdot h_1.$$

$$b. W_{BC} = P \cdot (h_1 + h_2).$$

$$c. W_{AC} = P \cdot h_2.$$

$$2. W_{AB} = -34 \text{ kJ}; W_{BC} = 59 \text{ kJ}; W_{AC} = 25 \text{ kJ}.$$

$$4. 1. \mathcal{P}_m = 4\,500 \times \frac{18}{16} = 51 \times 10^2 \text{ W} = 5,1 \text{ kW}.$$

2. a. La durée est doublée.

b. La puissance est divisée par 2.

Exercices

1. La force travaille dans les cas a. et d.
2. 1. W : travail; F : force; ℓ : distance entre les deux points envisagés pour le déplacement du point d'application de la force; α : angle entre la direction de la force et celle du déplacement du point d'application.
2. W en joule (J); F en NEWTON (N); ℓ en mètre (m).
3. La force doit être constante.
3. Cas (a): le travail est résistant; le poids est dirigé vers le bas et son point d'application s'élève.
Cas (b): le travail est moteur; le poids est dirigé vers le bas et son point d'application s'abaisse.
Cas (c): le travail est nul; le poids est vertical et son point d'application se déplace suivant une horizontale (ces directions sont perpendiculaires).
4. 1. $W = -m \cdot g \cdot h$. 2. $W = -15 \text{ J}$.
5. 1. $W = \mathcal{P} \cdot \Delta t$ avec W en joule (J), $\mathcal{P}$ en watt (W) et t en seconde (s).
2. $W = 1,0 \text{ kJ}$.
6. La force travaille dans les trois premiers cas.
7. 1. $W = F \cdot \ell$.
2. $W = 2,0 \text{ kJ}$.
8. 2. $W = \vec{F} \cdot \vec{AB} = -F \cdot AB \cdot \cos 30^\circ$.
3. $W = -1,3 \text{ kJ}$.
9. 1. c. $W = F \cdot \ell \cdot \cos 20^\circ$;
 $W = 47 \times 10^3 \times 1,3 \times 10^3 \times \cos 20^\circ = 57 \times 10^6 \text{ J}$.
2. a. La poussée d'ARCHIMÈDE est une force verticale, dirigée vers le haut.
b. Le travail de cette force est nul.
10. 1. a. $W = -f \cdot L$; $W = -4,5 \times 10^5 \text{ J}$.
b. Ce travail est résistant.
2. Le travail du poids du tronc est nul (cette force est verticale et le déplacement horizontal).
3. $T \cdot \cos 20^\circ = f$; $T = \frac{f}{\cos 20^\circ} = \frac{15 \times 10^3}{\cos 20^\circ}$;
 $T = 1,6 \times 10^3 \text{ N}$.
11. a. Vrai.
b. Généralement faux, sauf si les forces exercées sont égales.
c. Faux.
d. Vrai.
e. Faux.
12. 1. Le travail du poids ne dépend pas du chemin suivi.
2. Le travail est le même et vaut $1,0 \times 10^2 \text{ J}$.
13. 1. Chaque luge est soumise à son poids et à la réaction du sol.
2. Le travail du poids est moteur. Le travail de la réaction est nul (pas de frottement et $\vec{R}$ est perpendiculaire au déplacement).
3. $W = m \cdot g \cdot h$.

14. 1. $W = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = 8,2 \times 10^5 \text{ J}$.
2. Cela ne change pas le résultat, car le travail du poids est indépendant du chemin suivi.
15. 1. $W = 1,2 \text{ J}$. 2. $\mathcal{P} = 2,1 \text{ W}$.
16. 1. $F = m \cdot g = 49 \text{ kN}$.
2. $\mathcal{P} = F \cdot v = F \cdot \frac{h}{\Delta t} = 27 \text{ kW}$.
17. 1. $W = -m \cdot g \cdot h = -69,2 \text{ J}$.
2. $\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t} = 128 \text{ W}$.
18. 1. Position 1: Il y a des frottements, car $\vec{R}_1$ n'est pas perpendiculaire au sol.
Le poids qui contribue au déplacement effectue un travail moteur; la réaction qui s'oppose au déplacement effectue un travail résistant.
Position 2: Il n'y a pas de frottements, car la réaction $\vec{R}_2$ reste perpendiculaire au sol lors du déplacement de la luge.
La réaction ne travaille pas, car sa direction est perpendiculaire à la trajectoire de son point d'application: $\vec{R}_2$ est perpendiculaire à $\vec{v}_2$.
Le poids ne travaille pas pour la même raison.
Position 3: Il n'y a pas de frottements, car la réaction $\vec{R}_3$ est perpendiculaire au sol.
La réaction ne travaille pas, car sa direction est perpendiculaire à la trajectoire de son point d'application.
Le poids effectue un travail résistant, car il s'oppose au déplacement, vers le haut, de la luge.
2. Le mouvement est une translation uniforme lors du passage aux positions 1 et 2, car les forces se compensent.
Le mouvement est retardé pour la position 3, car la somme des forces est de sens opposé à la vitesse.
19. 1. Les forces appliquées au skieur sont le poids et la réaction du sol.
2. Le vecteur vitesse étant constant, les forces se compensent: leur somme vectorielle est nulle. La réaction est constamment opposée au poids et reste donc constante.
3. Ces travaux sont opposés: $W_1 = -W_2$.
4. $f = P \cdot \sin \alpha$; $f = 35 \times 9,8 \times \sin 35^\circ = 0,20 \text{ kN}$.
20. 1. a. La skieuse est soumise à son poids $\vec{P}$, à la réaction $\vec{R}$ de la piste et à la force $\vec{F}$ de traction de la perche.
b. D'après le principe d'inertie: $\vec{P} + \vec{F} + \vec{R} = \vec{0}$.
2. a. Le travail de la résultante est nul.
b. Travail du poids:
 $W_{AB}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h = -m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha$.
 $W_{AB}(\vec{R}) = 0$, car la réaction $\vec{R}$ est perpendiculaire au déplacement en l'absence de frottement.
 $W_{AB}(\vec{F}) = F \cdot L \cdot \cos \beta$.
c. $W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{F}) = 0$.
D'où: $F = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{\cos \beta} = 0,22 \text{ kN}$.

21. 1. a. Le colis est soumis à son poids $\vec{P}$ et à la force $\vec{F}$ exercée par le livreur.

Le mouvement étant uniforme :

$$\vec{P} + \vec{F} = \vec{0} \text{ et } F = P = m \cdot g.$$

$\vec{P}$ est une force verticale dirigée vers le bas, de valeur :

$$P = 60 \times 9,8 = 5,9 \times 10^3 \text{ N.}$$

$\vec{F}$ est une force verticale, dirigée vers le haut, de même valeur que le poids.

b. $W(\vec{F}) = -W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h$; $W(\vec{F}) = 8,8 \times 10^2 \text{ J.}$

2. a. Le colis est soumis à son poids $\vec{P}$, à la réaction $\vec{R}$ du plan incliné (perpendiculaire au plan, car il n'y a pas de frottements) et à la force $\vec{F}$ exercée par le livreur, parallèle aux lignes de plus grande pente du plan.

b. La somme de ces forces est nulle. Il en est de même pour le travail de leur résultante.

$$W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h; W(\vec{R}) = 0; W(\vec{F}) = F \cdot \ell.$$

$$F \cdot \ell = m \cdot g \cdot h; F = m \cdot g \cdot \frac{h}{\ell}; F = 2,9 \times 10^2 \text{ N.}$$

c. $W(\vec{F}) = F \cdot \ell = 8,8 \times 10^2 \text{ J.}$

d. On retrouve la même valeur.

3. Sur le plan incliné la force à exercer est plus faible, mais le déplacement plus grand.

22. Propositions exactes :

1. b. et c.; 2. b.; 3. A. a. et c.; 3. B. a.; 4. b. et c.; 5. b.

23. 1. La somme des deux forces appliquées est nulle : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$. La réaction du tapis est opposée au poids.

2. Cette force, parallèle aux lignes de plus grande pente du tapis, est dirigée vers le haut et a pour valeur $f = R \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha$.

3. a. $W(\vec{f}) = f \cdot L = m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha$;
pour $L = 20 \text{ m}$ et $\alpha = 30^\circ$, $W = 50 \times 10^2 \text{ J.}$

b. Le travail du poids est opposé :

$$W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h = -m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha.$$

4. Dans le référentiel terrestre :

$$\mathcal{P}(\vec{f}) = f \cdot v = W(\vec{f})/\Delta t.$$

Dans le référentiel du tapis, le minerai est immobile et la puissance est nulle.

5. $\mathcal{P} = M \cdot g \cdot h/\Delta t = M \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha/\Delta t$;
 $\mathcal{P} = 5,0 \text{ kW.}$

24. 1. $W = 93 \times 10^5 \text{ J.}$

2. $2,0 \times 10^3 \text{ MW.}$

3. Débit de 100 m^3 . Le barrage de Grand-Maison remplace une centrale nucléaire possédant deux réacteurs.

25. 1. La boule du pendule est soumise à son poids, à la tension du fil et à la force de frottement due à l'air.

2. Le mouvement n'est pas uniforme (la vitesse s'annule même). La tension du fil, constamment perpendiculaire à la trajectoire de son point d'application, ne travaille pas.

3. $W = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot \ell \cdot (\cos \theta - \cos \theta_0)$.

4. $W = 0,1 \times 10 \times 1 \times (\cos 15^\circ - \cos 30^\circ) = 0,10 \text{ J.}$

26. 1. a. $\sin \beta = 0,06$; $\beta = 3,4^\circ$.

2. a. $F \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot \sin \beta$.

c. $m = \frac{F \cdot \cos \alpha}{g \cdot \sin \beta}$; $m = 4,4 \times 10^2 \text{ kg.}$

2. a. Au minimum entre 7 (blocs les plus petits) et 35 ouvriers (blocs les plus gros).

b. $W = m \cdot g \cdot h = 4,4 \times 10^6 \text{ J.}$

c. $\ell = \frac{h}{\sin \beta}$; $\ell = 2,4 \text{ km.}$

3. a. $F = m \cdot g = 3,0 \times 10^4 \text{ N.}$

Il aurait fallu 100 ouvriers.

b. et c. Le travail global est le même.

d. Le nombre d'ouvriers est en réalité plus important, car il y a des frottements.

4. Avec un plan incliné, la force à exercer est plus faible, mais le déplacement plus grand.

Exercice d'évaluation

Énoncé

Une cabine de funiculaire est tractée par un câble dont la tension est assurée par un moteur électrique commandé par ordinateur. La voie est construite sur une pente faisant un angle de 45° avec le plan horizontal. La masse de la cabine est $m = 3,6 \text{ t}$. Lors des déplacements, le mouvement est rectiligne.

A. Démarrage de la cabine à la montée

Le calculateur ajuste la tension du câble de traction de telle sorte que l'accroissement de la vitesse soit de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pendant les trois premières secondes de la montée.

1. Représenter le vecteur $\Delta \vec{v}_G$ et la résultante des forces $\vec{F}$ appliquées à la cabine. Justifier cette représentation.

2. Calculer la vitesse acquise à la fin de cette phase de démarrage.

B. Montée de la cabine à vitesse constante

1. Faire l'inventaire des forces agissant sur la cabine lors de cette phase.

2. Quelle relation ces forces vérifient-elles? Justifier.

3. La composante de frottement sur la voie est 0,12 fois la composante normale. Représenter les forces et déterminer les valeurs de leurs composantes tangentielle et normales.

4. La vitesse est $v = 10,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

a. Établir la relation entre la puissance développée $\mathcal{P}$ et la valeur de la force F dont le point d'application se déplace à la vitesse v au cours d'un déplacement rectiligne et uniforme.

b. Calculer la puissance développée par la force exercée par le câble.

5. Calculer le travail de la force de pesanteur lorsque la cabine passe de l'altitude $z_1 = 1052 \text{ m}$ à l'altitude $z_2 = 1437 \text{ m}$.

C. Arrivée de la cabine

Le dispositif informatisé ajuste la tension du câble de telle sorte que la cabine s'immobilise en 3 secondes.

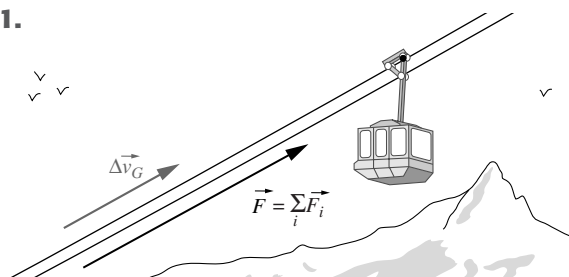
Représenter le vecteur $\Delta \vec{v}_G$ et la résultante $\vec{F}$ des forces agissant sur la cabine.

D. Descente de la cabine à vitesse constante

1. Faire l'inventaire des forces appliquées à la cabine.
2. Les frottements sont inchangés. Déterminer les composantes tangentielle et normale des forces appliquées.
3. Évaluer la puissance développée par la traction du câble, la vitesse de descente étant égale à $10,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
4. Calculer, pour un déplacement de longueur $L = 544 \text{ m}$, le travail :
 - a. de la traction du câble;
 - b. de la résultante des frottements;
 - c. du poids de la cabine.
5. Évaluer le travail de la résultante des forces agissant sur la cabine au cours de la descente à vitesse constante.

Corrigé

A. 1.



La deuxième loi de NEWTON relie $\vec{F}$ et $\Delta \vec{v}_G$: ces deux vecteurs ont mêmes direction et sens.

2. En 3 secondes, la vitesse augmente de $3 \times 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à partir de la valeur 0 ; donc $v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

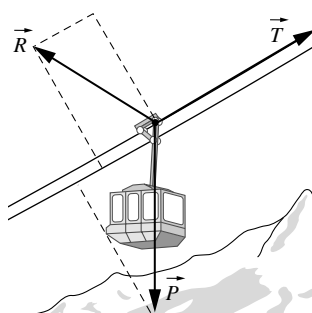
B. 1. Les forces agissant sur la cabine sont :

- son poids $\vec{P}$;
- la traction $\vec{T}$ du câble;
- la réaction $\vec{R}$ du support (voie).

2. D'après la première loi de NEWTON, ou principe de l'inertie, ces forces se compensent, car la cabine a un mouvement rectiligne et uniforme :

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{R} = \vec{0}.$$

3. Représentation des forces appliquées :



Calcul des valeurs des composantes : $P_T = P \cdot \sin 45^\circ$, avec $P = 3,6 \times 10^3 \times 9,8 = 3,5 \times 10^4 \text{ N}$.

$$P_T = 2,5 \times 10^4 \text{ N}.$$

$$P_N = P \cdot \cos 45^\circ; P_N = 2,5 \times 10^4 \text{ N}.$$

$$R_N = P_N; R_N = 2,5 \times 10^4 \text{ N}.$$

$$R_T = 0,12 \times R_N; R_T = 3,0 \times 10^3 \text{ N}.$$

$$T = P_T + R_T; T = 2,8 \times 10^4 \text{ N}.$$

$$4. \text{ a. } \mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t} = T \cdot v.$$

$$\text{b. } \mathcal{P} = 2,8 \times 10^4 \times (10,8/3,6); \mathcal{P} = 84 \text{ kW ou } 113 \text{ ch}.$$

$$5. W = P \cdot (z_1 - z_2);$$

$$W = 3,5 \times 10^4 \times (1052 - 1437), \text{ soit } W = -14 \text{ MJ}.$$

C. D'après la deuxième loi de NEWTON, les vecteurs $\Delta \vec{v}_G$ et $\vec{F}$ ont mêmes direction et sens.

D. 1. Les forces sont les mêmes : le poids, la traction du câble et la réaction du support.

2. La représentation des forces appliquées à la cabine est donnée ci-contre.

Les valeurs des composantes du poids sont inchangées :

$$P_T = P_N = 2,5 \times 10^4 \text{ N}.$$

Les valeurs des composantes de la réaction sont les mêmes :

$$R_T = 3,0 \times 10^3 \text{ N et } R_N = 2,5 \times 10^4 \text{ N}.$$

La traction du câble et la composante tangentielle de la réaction compensent la composante tangentielle du poids ; d'où la relation : $T + R_T = P_T$; soit $T = P_T - R_T$.

$$T = 2,5 \times 10^4 - 3,0 \times 10^3 = 2,2 \times 10^4 \text{ N}.$$

3. Nous utilisons la relation établie en B. 4. :

$$\mathcal{P} = T \cdot v = 2,2 \times 10^4 \times 3, \text{ soit } \mathcal{P} = 66 \text{ kW ou } 90 \text{ ch}.$$

4. Calcul du travail :

a. de la traction du câble : $W_1 = -T \cdot L$; $W_1 = -12 \text{ MJ}$;

b. de la réaction du support : $W_2 = -R_T \cdot L$;

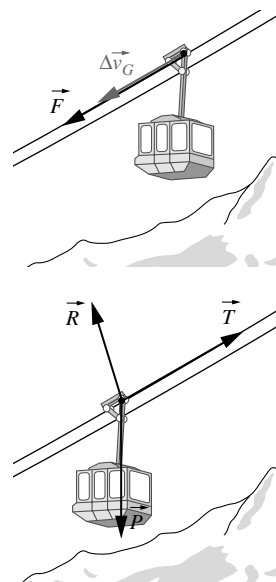
$$W_2 = -1,6 \text{ MJ} ;$$

c. du poids : $W_3 = + P \cdot h = + P \cdot L \cdot \sin 45^\circ$;

$$W_3 = 13,6 \text{ MJ ou } 14 \text{ MJ avec deux chiffres significatifs}.$$

5. Évaluation du travail reçu par la cabine et fourni par les forces appliquées

Ce travail est nul, car la cabine est en translation rectiligne et uniforme. La résultante des forces est nulle, donc son travail est également nul. En effet, on constate que $W_1 + W_2 + W_3 = 0$.



Bibliographie

Ouvrage

J.-M. BRÉBEC et coll., *H Prépa Mécanique II*, Hachette, 1999.

Sites Internet

www.up.univ.mrs.fr/~laugierj/cabri.java/

www.hachette-education.com

Le travail, un mode de transfert d'énergie

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

II. Forces, travail et énergie

B. Travail mécanique et énergie

2. Le travail : un mode de transfert de l'énergie

Contenus

2.1 Travail et énergie cinétique

• Dans un référentiel terrestre, étude expérimentale de la chute libre d'un corps au voisinage de la Terre ; travail

du poids : $W_{AB}(P) = \Delta \left[\frac{1}{2} M \cdot V_G^2 \right]$

• Interprétation énergétique ; définition de l'énergie cinétique d'un solide en translation.

• Généralisation : pour un solide en translation soumis à diverses forces :

$$\frac{1}{2} M \cdot V_B^2 - \frac{1}{2} M \cdot V_A^2 = \Sigma W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}})$$

2.2. Travail et énergie potentielle de pesanteur

• Énergie potentielle d'un solide en interaction avec la Terre.

• Cas particulier des situations localisées au voisinage de la Terre. Relation $E_p = M \cdot g \cdot z$.

• Transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique dans le cas de la chute libre.

Connaissances et savoir-faire exigibles

• Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un solide en translation.

• Mettre en œuvre un dispositif décrit.

• Utiliser le fait qu'entre deux positions, dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un solide en translation est égale à la somme des travaux des forces extérieures.

• Utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur d'un solide au voisinage de la Terre.

• Expliciter la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique dans des cas simples.

Exemples d'activités

- Utiliser un tableur et un grapheur.
- Étude quantitative des variations de la valeur de la vitesse d'un corps dans différentes situations* :
 - chutes libres avec et sans vitesse initiale (utilisation de capteurs chronocinés, de logiciels, de vidéos...);
 - satellites en mouvement circulaire uniforme ;
 - solide lancé sur une table...

Commentaires

Travail et énergie cinétique

On part ici de situations concrètes permettant d'étudier les effets d'une force extérieure sur la valeur de la vitesse du centre d'inertie d'un solide en translation, en particulier l'influence de la direction de la force par rapport à la direction du vecteur vitesse (étude de la chute libre d'un solide sans vitesse initiale, étude de la chute libre avec vitesse initiale vers le haut durant la montée ou d'un mouvement de projectile, étude du mouvement circulaire d'un satellite, étude d'un solide lancé et s'arrêtant sur un plan horizontal, etc.).

L'idée est de chercher s'il existe une relation entre la valeur de la vitesse du centre d'inertie du solide et le travail des forces extérieures. Cette relation est d'abord introduite par le calcul du travail du poids dans le cas de la chute libre d'un corps au voisinage de la Terre. On interprète de façon énergétique cette relation de la façon suivante : le travail du poids a servi à faire varier la vitesse du solide. On définit l'énergie cinétique d'un solide en translation par la relation $\frac{1}{2} M \cdot V_G^2$; l'énergie cinétique est donc une grandeur caractéristique de son état de mouvement.

Cette relation est ensuite généralisée à d'autres exemples simples, où d'autres forces que celle de pesanteur agissent.

Pour un solide en translation, la somme des travaux des forces extérieures $\Sigma W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}})$ est aussi égale au « travail » de leur résultante $\Sigma(\vec{F}_{\text{ext}})_{AB}$ tous les points du solide ayant le même déplacement AB que le centre d'inertie.

* Activité pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication.

Travail et énergie potentielle de pesanteur

Le choix fait a pour but d'éviter les changements du système étudié lors de l'analyse énergétique de l'interaction d'un corps avec la Terre : le système est le solide soumis à une force extérieure connue (à la surface de la Terre : le poids). C'est pour cela que l'énergie potentielle d'interaction solide-Terre est désignée dans la colonne centrale des *Contenus* par « énergie potentielle d'un solide en interaction avec la Terre ». On introduit qualitativement la variation d'énergie potentielle de pesanteur comme étant le travail qu'il faut fournir pour éloigner un corps du centre de la Terre d'un point A à un point B , le corps étant au repos en A et en B . Pour élever le centre d'inertie de ce corps de l'altitude z_A à l'altitude z_B , il faut lui appliquer et faire travailler une force F (c'est la force exercée par l'opérateur). L'application de la loi précédente s'écrit alors :

$$\frac{1}{2} M \cdot V_B^2 - \frac{1}{2} M \cdot V_A^2 = W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}}) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{F}).$$

V_A et V_B étant nulles, on en déduit que :

$$W_{AB}(\vec{F}) = -W_{AB}(\vec{P}) = M \cdot g \cdot (z_B - z_A).$$

L'énergie potentielle de pesanteur est définie par la grandeur $M \cdot g \cdot z$, z étant l'altitude.

Pour illustrer la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique, on pourra faire un retour sur la chute libre ou sur un mouvement de projectile et constater

que la somme $\frac{1}{2} M \cdot V_B^2 + M \cdot g \cdot z$ est constante. On

fait remarquer la cohérence du discours énergétique introduit dans la partie précédente, à savoir que du travail pouvait accroître l'énergie cinétique d'un corps. Ici il accroît son énergie potentielle, qui elle-même peut ultérieurement se transformer en énergie cinétique.

On aborde ainsi une première fois la conservation de l'énergie sans pour autant l'évoquer de manière explicite aux élèves.

Matériel

Cours

➤ Activité 1

- Un système d'enregistrement du mouvement d'une bille en chute libre (table à digitaliser, webcam...).
- Un logiciel de traitement (synchronie).

➤ Activité 2

- Un mobile autoporteur muni d'un éclateur.
- Une table et un niveau.
- Un appareil à force constante.
- Un dynamomètre.

➤ Activité 3

- Un enregistrement de la chute d'une balle de golf.
- Un logiciel de traitement d'image avec pointage image par image des positions lors de la chute et un logiciel de traitement des mesures.

➤ Activité 4

- Un enregistrement de la chute d'une bille dans un liquide.
- Un logiciel de traitement d'image avec pointage image par image des positions lors de la chute et un logiciel de traitement des mesures.

Rechercher et expérimenter

- Un pendule simple.
- Un enregistrement du mouvement d'un pendule simple.
- Un logiciel de traitement d'image avec pointage image par image des positions du pendule et un logiciel de traitement des mesures.

Déroulement du chapitre

L'objectif est d'introduire différentes formes d'énergie à partir de la notion de travail d'une force, tout en montrant que, selon les situations, ces différentes formes sont susceptibles de se transformer les unes dans les autres. Le but est ainsi de progresser vers l'idée de conservation.

➤ Objectifs

- Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un solide en translation.
- Appliquer le théorème de l'énergie cinétique.
- Utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur.
- Expliciter la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique dans des cas simples.

➤ Prérequis

Connaître le travail d'une force constante.

Activités préparatoires

A. Ralentir !

Ce texte permet de relier, en première approche, la vitesse d'un véhicule à une forme d'énergie.

Réponses aux questions

1. Pendant le temps de réaction la vitesse v du véhicule est constante. La distance D_R parcourue pendant la durée Δt de réaction (environ 1 seconde) est donc $D_R = v \cdot \Delta t$; D_R est proportionnelle à la vitesse.

2. On calcule les rapports $\frac{D_A}{v}$ et on obtient les différentes valeurs suivantes en exprimant les distances en m et les vitesses en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$: 1,6 ; 2,0 ; 2,8 ; 3,6.

La distance d'arrêt n'est pas proportionnelle à la vitesse, elle augmente d'autant plus que la vitesse est grande. Or $D_A = D_R + D_F$, on en déduit donc que D_F la distance de freinage n'est pas proportionnelle à la vitesse.

3. Pour arrêter le véhicule, il faut exercer sur lui des forces par l'intermédiaire des freins, forces qui s'opposent au mouvement et dont le travail est résistant. On peut dire que le véhicule possède une énergie liée à sa vitesse.

B. Monter ou descendre en funiculaire ?

Cet exemple illustre le transfert d'un travail d'un système à un autre et permet donc de découvrir l'existence d'une certaine énergie de position.

Réponses aux questions

1. Les travaux des poids de chaque wagon identique sont égaux et opposés s'ils transportent le même nombre de passagers. Pour le wagon qui monte, le travail du

poids est résistant alors que pour le wagon qui descend le travail de son poids est moteur.

2. Le câble permet à des forces de s'exercer entre les wagons. La force appliquée au wagon qui monte effectue un travail moteur et celle appliquée au wagon qui descend, un travail résistant. Ces travaux sont égaux en valeur et sont de signes opposés si les wagons transportent le même nombre de passagers. Quand un wagon descend, il entraîne l'autre qui monte; il semble que le wagon situé en haut possède une énergie qu'il peut communiquer à l'autre.

3. Si l'un le wagon qui monte a plus de passagers que l'autre, il faut un moteur pour faire monter; si c'est l'inverse, il faut des freins pour la descente.

Cours

1. Comment le travail du poids peut-il modifier la vitesse d'un corps ?

Nous avons choisi, comme le préconise le programme, d'introduire la notion d'énergie cinétique à partir de la chute libre d'une bille.

► Activité 1

Dans l'activité 1, le logiciel permet de déterminer pour différentes valeurs de h , la vitesse v_G de son centre d'inertie, de calculer son carré, de tracer l'évolution de v_G , puis v_G^2 en fonction de h et d'établir la relation $v^2 = 2 \cdot g \cdot h$ en exprimant g avec une nouvelle unité, le $m \cdot s^{-2}$.

En faisant référence au travail du poids, on montre alors que :

$$W_{AB}(\vec{P}) = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2.$$

Cette relation permet d'introduire l'énergie cinétique de la bille et de généraliser cette expression à un solide en translation.

Remarque : Il est nécessaire d'insister sur le fait que le solide doit être en translation, car pour un solide en mouvement quelconque par rapport à un référentiel :

$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v_G^2 + E_C^*$; E_C^* est l'énergie cinétique du solide dans le référentiel barycentrique, énergie cinétique de rotation.

Réponses aux questions

1. L'expérience montre que v^2 est proportionnel à h , soit $v^2 = k \cdot h$.
2. k est de l'ordre de $20 m \cdot s^{-2}$.
3. La relation est indépendante de la masse pour des mobiles de petite surface et de masse suffisante (force exercée par l'air négligeable devant le poids).

2. Comment modifier l'énergie cinétique d'un solide en translation ?

► Activité 2

L'activité 2 permet d'exercer sur un solide en translation une force constante autre que le poids et de montrer que d'autres forces que le poids peuvent faire varier l'énergie cinétique d'un solide. La valeur de cette force $\vec{F}$ est mesurée avec un dynamomètre. L'enregistrement du mouvement rectiligne du palet autoporteur permet de réinvestir la détermination de la vitesse en un point

de la trajectoire. Après une analyse des forces exercées sur le palet, on vérifie la relation : $\Delta E_C = W_{AB}(\vec{F})$; les travaux du poids et de l'action du coussin d'air étant nuls. On peut alors généraliser et énoncer le théorème de l'énergie cinétique pour un solide en translation.

Remarque : Si le système n'est pas un solide (système déformable), le travail des forces intérieures intervient et modifie l'énergie cinétique du système.

Réponses aux questions

1. et 2. Les valeurs dépendent du matériel choisi et de la durée de l'enregistrement.
3. $\vec{F}$ force constante exercée par le système d'aspiration, $\vec{P}$ poids du mobile autoporteur, $\vec{R}$ action du coussin d'air qui compense le poids.
4. On montre que $\Delta E_C = W_{AB}(\vec{F})$.

3. Comment définir l'énergie liée à l'altitude ?

On introduit qualitativement la variation d'énergie potentielle de pesanteur comme étant le travail qu'il faut fournir pour déplacer la valise d'un point A à un point B . Pour élever le centre d'inertie de ce corps de l'altitude z_A à l'altitude z_B , il faut lui appliquer une force F (c'est la force exercée par l'opérateur). L'application du théorème de l'énergie cinétique s'écrit alors :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v^2 = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{F}).$$

Comme v_A et v_B sont nulles, on en déduit que :

$$W_{AB}(\vec{F}) = m \cdot g \cdot (z_B - z_A).$$

Il y a eu transfert d'énergie à la valise grâce au travail de la force exercée par l'opérateur. Ce travail fait varier une grandeur liée aux caractéristiques de la valise (position et poids); cette grandeur est l'énergie potentielle de pesanteur, définie comme une énergie de position par la grandeur $m \cdot g \cdot z$, z étant l'altitude de l'objet.

L'exercice 14 et la rubrique *Aborder les difficultés du chapitre* mettent en évidence l'influence du choix de l'origine de l'axe vertical ascendant, qui doit être bien précisé, sur la valeur de l'énergie potentielle de pesanteur.

4. L'énergie cinétique peut-elle se transformer en énergie potentielle et réciproquement ?

Les deux activités 3 et 4 permettent de montrer les échanges totaux ou partiels de l'énergie cinétique en énergie potentielle et *vice versa*, et nous amènent à introduire l'énergie mécanique $E_M = E_p + E_C$. Dans le programme, ce terme n'apparaît pas dans les *contenus-notions*, cependant les commentaires nous incite à l'aborder :

« Pour illustrer la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique, on pourra faire un retour sur la chute libre ou sur un mouvement de projectile et constater que la somme $\frac{1}{2} m \cdot V^2 + M \cdot g \cdot z$ est constante [...]. On comprend bien l'échange d'énergie entre les deux formes. »

► Activité 3

Réponses aux questions

1. et 2. Au cours de la chute, l'énergie cinétique croît tandis que l'énergie potentielle décroît.

3. La somme de ces deux formes d'énergie est constante au cours de la chute libre, ce qui permet de montrer que l'énergie potentielle se transforme intégralement en énergie cinétique.

➤ Activité 4

L'activité 4 permet de réinvestir des expériences réalisées en Seconde et de montrer l'existence d'une vitesse limite dans la chute d'un objet dans un liquide. Elle montre que lorsque le solide est soumis à d'autres forces que le poids, l'énergie mécanique n'est plus constante.

Réponse à la question

On observe qu'au cours de la chute l'énergie potentielle décroît plus vite que ne croît l'énergie cinétique; celle-ci se stabilise d'ailleurs, car la bille atteint une vitesse limite. L'énergie mécanique de la bille diminue, car l'eau exerce une action sur la bille qui n'est plus alors soumise qu'à son seul poids.

➤ Exercice d'entraînement

On peut illustrer la conservation de l'énergie mécanique par l'exercice d'entraînement suivant traitant d'un mouvement de chute libre avec vitesse initiale.

Énoncé

Rémi veut étudier le mouvement d'une fléchette tirée verticalement vers le haut par son pistolet. Négligeant l'action de l'air et prenant $g = 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour l'intensité de la pesanteur, il considère sa fléchette comme un objet de masse m en mouvement de translation vertical. La vitesse initiale de la fléchette a une valeur de $5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; l'altitude de lancement est égale à $1,7 \text{ m}$.

1. Quelle sera la vitesse de la fléchette au plus haut de son parcours?

2. Quelle sera alors la hauteur atteinte par la fléchette de Rémi?

Corrigé

1. Comme seul le poids travaille, l'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle. Elle diminue au fur et à mesure que la fléchette s'élève jusqu'à avoir une valeur nulle quand la fléchette est au sommet.

2. Choisissons l'origine de l'énergie potentielle au sol (voir schéma ci-contre).

• À l'instant de lancement :

$$E_M(A) = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 + m \cdot g \cdot z_A.$$

• Au cours du mouvement :

$$E_M = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z.$$

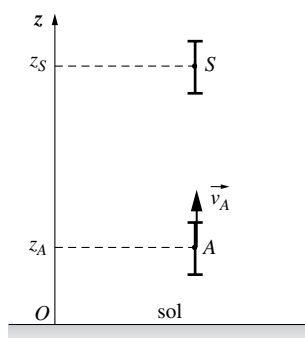
• Au sommet de la trajectoire :

$$E_M(S) = m \cdot g \cdot z_S.$$

L'énergie mécanique se conserve $E_M(A) = E_M(S)$, donc :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_A^2 + m \cdot g \cdot z_A = m \cdot g \cdot z_S \text{ soit } z_S = \frac{1}{2g} v_A^2 + z_A.$$

Application numérique : $z_S = 3,0 \text{ m}$.



Rechercher et expérimenter

1. Étude énergétique d'un pendule simple

Réponses aux questions

I. Les frottements sont faibles

1. La boule effectue des oscillations de part et d'autre de sa position d'équilibre.

2. L'énergie cinétique est nulle au moment du lâcher de la bille. Elle croît, passe par une valeur maximale lorsque le fil du pendule est vertical, puis diminue et finit par s'annuler; le mouvement recommence alors en sens contraire.

3. Entre deux dates quelconques, les variations sont opposées, en effet $E_C + E_P = E_M = \text{constante}$; donc $\Delta E_P + \Delta E_C = 0$, soit $\Delta E_P = -\Delta E_C$.

4. L'énergie mécanique se conserve.

II. Les frottements sont importants

1. Les maxima des énergies diminuent au cours du temps; l'amplitude des oscillations diminue et le pendule finit par s'arrêter.

2. L'énergie mécanique diminue au cours du temps, car il y a des forces de frottements, autres que le poids, qui s'exercent sur le pendule.

3. Au cours d'une demi-période :

$$\Delta E_M = E_{Mf} - E_{Mi} = 102 - 110 = -8 \text{ J}.$$

Le système perd de l'énergie du fait des frottements.

2. L'horloge mécanique à balancier

Réponses aux questions

1. Un pendule simple est une boule de petite dimension suspendue à un fil inextensible de longueur ℓ .

2. L'amortissement est dû aux forces de frottement exercées par l'air sur le fil et la boule au cours du mouvement.

3. $W = m \cdot g \cdot h$; $W = 17,2 \text{ J}$.

4. Le travail du poids compense celui des forces de frottements, donc $W(\text{forces de frottement}) = -17,2 \text{ J}$.

5. Pour entretenir le mouvement dans une horloge à balancier, il faut remonter le « poids » au sommet, ce qui donne à celui-ci une énergie potentielle. Au cours de la descente, il échange son énergie sous forme de travail au mécanisme de l'horloge.

Dans une montre mécanique, cette énergie est fournie par un ressort spiral que l'on tend (en tournant un bouton), ce qui lui permet d'acquérir une énergie potentielle dite élastique qu'il échange ensuite avec les divers mécanismes de rotation des aiguilles.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. 1. a. $E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ pour un mobile en translation de vitesse $v = \frac{90}{3,6} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

• Pour une voiture de masse $m = 1,0 \times 10^3 \text{ kg}$, $E_C = 3,1 \times 10^5 \text{ J}$.

• Pour un camion de masse $m' = 30 \times 10^3 \text{ kg}$, $E_C = 9,4 \times 10^6 \text{ J}$, soit 30 fois plus.

b. Une voiture de masse $m = 1,0 \times 10^3 \text{ kg}$ ayant même énergie cinétique que le camion, $E_C = 9,4 \times 10^6 \text{ J}$,

aurait une vitesse v_G telle que $v_G^2 = \frac{2E_C}{m}$.

$$v_G^2 = 1,9 \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}, \text{ soit } v = 1,4 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v = 4,9 \times 10^2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, \text{ soit près de } 500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}!!!$$

2. L'arrêt brutal d'un poids lourd lancé à $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ lors d'un choc provoque des dégâts comparables à ceux provoqués par celui d'une voiture lancée à $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Il est donc logique de limiter davantage la vitesse des poids lourds que celle des véhicules légers.

2. 1. Dans un référentiel galiléen, la variation d'énergie cinétique d'un solide en translation entre deux positions A et B est égale à la somme des travaux des forces extérieures $\vec{F}_{\text{ext}}$ appliquées à ce solide :

$$E_C(B) - E_C(A) = \sum W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}}).$$

2. Le traîneau est soumis à son poids $\vec{P}$ vertical descendant, à la force de traction $\vec{F}$, à la réaction normale $\vec{N}$ de la neige et la résultante $\vec{f}$ des forces de frottement.

$$3. \text{ a. } \Delta E_C = \sum W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}}) \\ = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{F}) + W_{AB}(\vec{N}) + W_{AB}(\vec{f})$$

$$W_{AB}(\vec{P}) = 0 \text{ J et } W_{AB}(\vec{N}) = 0 \text{ J};$$

$$\Delta E_C = F \cdot AB - f \cdot AB = 10 (200 - 100);$$

$$\Delta E_C = 1,0 \times 10^3 \text{ J};$$

$$\Delta E_C = E_C(B) - E_C(A) \text{ avec } E_C(A) = 0 \text{ J.}$$

$$\text{D'où : } E_C(B) = \Delta E_C = 1,0 \times 10^3 \text{ J.}$$

b. La vitesse v_B est telle que $v_B^2 = \frac{2E_C(B)}{m}$, soit :

$$v_B = 2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 8,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

3. 1. a. Cas 1 : L'origine de l'énergie potentielle est le niveau de la mer.

$E_p = m \cdot g \cdot z$ avec $z = 0 \text{ m}$ et $E_p = 0 \text{ J}$ au niveau de la mer; on a $z = 10 \text{ m}$ et :

$$E_p = 80 \times 9,8 \times 10 = 7,8 \times 10^3 \text{ J}$$

Cas 2 : L'origine de l'énergie potentielle est l'altitude du vol de l'hélicoptère.

b. $E_p = m \cdot g \cdot z$ avec $z = 0 \text{ m}$ et $E_p = 0 \text{ J}$ au niveau de l'hélicoptère; on a $z = -5 \text{ m}$ et :

$$E_p = 80 \times 9,8 \times (-5) = -3,9 \times 10^3 \text{ J.}$$

$$2. \text{ Cas 1 : } \Delta E_p = E_p(B) - E_p(A) = m \cdot g \cdot z_B - m \cdot g \cdot z_A \\ = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$$

avec $z_A = 0 \text{ m}$ et $z_B = 10 \text{ m}$.

$$E_p = 7,8 \times 10^3 \text{ J.}$$

$$\text{Cas 2 : } \Delta E_p = E_p(B) - E_p(A) = m \cdot g \cdot z_B - m \cdot g \cdot z_A \\ = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$$

avec $z_A = -15 \text{ m}$ et $z_B = -5 \text{ m}$.

$$\Delta E_p = 7,8 \times 10^3 \text{ J.}$$

3. Quelle que soit l'origine choisie sur l'axe vertical ascendant pour exprimer l'énergie potentielle, la variation d'énergie potentielle est la même entre deux positions.

4. 1. Le travail du poids est un travail moteur; il ne dépend que de la différence d'altitude du centre d'inertie entre les deux positions :

$$W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = 1,0 \times 10^3 \times 9,8 \times 100 \\ = 9,8 \times 10^5 \text{ J.}$$

2. La variation d'énergie potentielle est égale à l'opposée du travail du poids, elle diminue :

$$\Delta E_p = -W_{AB}(\vec{P}) = -9,8 \times 10^5 \text{ J.}$$

$$5. \text{ 1. a. } \Delta E_p = -W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_B - z_A) \\ = -m \cdot g \cdot h = -m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha.$$

$$\Delta E_p = -400 \times 9,8 \times 50 \times \sin 10^\circ = -3,4 \times 10^4 \text{ J.}$$

b. Le traîneau est soumis à son poids $\vec{P}$ et à la réaction de la glace $\vec{N}$ perpendiculaire au déplacement dont le travail $W_{AB}(\vec{N})$ est nul. Seul intervient le travail du poids. Comme dans le cas d'une chute libre, on a $\Delta E_C = -\Delta E_p = 3,4 \times 10^4 \text{ J}$.

2. a. On peut comme précédemment calculer ΔE_p , mais on ne peut plus calculer ΔE_C , car intervient aussi le travail de la résultante des forces de frottement. On a alors $\Delta E_C \neq -\Delta E_p$.

b. Il faudrait connaître les caractéristiques de la résultante des forces de frottement pour calculer son travail et appliquer le théorème de l'énergie cinétique.

Exercices

$$1. \text{ 1. } E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

2. L'énergie cinétique E_C s'exprime en joule, la masse m du solide s'exprime en kg, la vitesse v du solide s'exprime en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Elle dépend du référentiel puisque la vitesse en dépend.

4. Lorsque la vitesse d'un solide est multipliée par 2, son énergie cinétique est multipliée par 4.

5. Non, une variation d'énergie cinétique est égale à la différence entre sa valeur finale et sa valeur initiale.

2. 1. Dans un référentiel galiléen, la variation d'énergie cinétique d'un solide, entre deux instants, est égale à la somme des travaux des forces extérieures appliquées à ce solide :

$$E_{CB} - E_{CA} = \sum W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}})$$

2. Lorsque la somme des travaux des forces appliquées au solide est nulle, son énergie cinétique ne varie pas.

3. Lors d'une chute libre, seul intervient le travail du poids, puisque c'est la seule force appliquée.

3. 1. $E_p = m \cdot g \cdot z$. Elle est définie par rapport à un point de référence de cote $z = 0$.

2. L'énergie potentielle E_p s'exprime en joule (J), m la masse du solide s'exprime en kg, g l'intensité de la pesanteur en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ et z la cote (ou altitude) du centre d'inertie du solide en m.

4. a. Faux : l'énergie potentielle de pesanteur d'un solide augmente lorsque son altitude augmente.

b. Faux : s'il perd de l'énergie à altitude constante, sa vitesse diminue.

c. Vrai.

d. Faux : dans le cas de la chute libre, si l'altitude du solide diminue son énergie reste constante.

5. a. Vrai ; b. faux : l'énergie potentielle de pesanteur diminue lorsque l'énergie cinétique augmente ; c. vrai ; d. vrai ; e. vrai.

6. 1. Tracés ; $v^2(z)$ est une droite affine.

2. a. La relation $v^2 = az + b$ convient ; le tableur donne comme modélisation $v^2 = -19,7z + 46,5$ avec z en m et v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. À $z = 0$, l'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées donne $v_0^2 \approx 46,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, soit $v_0 \approx 6,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. L'intersection avec l'axe des abscisses donne l'altitude de départ $z_0 = 2,4 \text{ m}$ environ.

d. $v^2 = -19,7 \cdot z + 46,5$ avec z en m et v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $a = -19,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et $b = 46,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

e. $|a| \approx 2g$.

3. a. Énergies cinétiques $E_C(A) = 0,01 \text{ J}$ et $E_C(B) = 0,54 \text{ J}$.

b. Travail du poids :

$$W_{AB} = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = 0,53 \text{ J}.$$

c. La variation d'énergie cinétique :

$$E_C(B) - E_C(A) = 0,53 \text{ J}$$

est égale au travail W_{AB} du poids, ceci vérifie le théorème de l'énergie cinétique.

7. Les deux énergies cinétiques sont égales :

$$E_C = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 ; \text{ d'où } v_1^2 = v_2^2 \cdot \frac{m_2}{m_1}.$$

Avec $m_2 = 10 \times 10^3 \text{ kg}$ et $v_2 = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on obtient $v_1 = 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit $v_1 = 2,1 \times 10^2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ environ.

8. 1. $E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2$.

Avec $v = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ et $m = 1250 \text{ kg}$;

$$E_{C1} = \frac{1}{2} \times 1250 \times \left(\frac{50}{3,6}\right)^2 = 1,2 \times 10^5 \text{ J}.$$

Avec $v = 130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $E_C = 8,2 \times 10^5 \text{ J}$.

2. En chute libre $\Delta E_C = m \cdot g \cdot h$; $h_1 = \frac{\Delta E_{C1}}{m \cdot g} = 9,8 \text{ m}$ et $h_2 = 67 \text{ m}$.

$$3. E'_{C1} = \frac{E_{C1} \times 12,5 \times 10^3}{1250} = 12 \times 10^5 \text{ J} ;$$

$$E'_{C2} = \frac{E_{C2} \times 12,5 \times 10^3}{1250} = 82 \times 10^5 \text{ J} ;$$

$$h'_1 = \frac{\Delta E'_{C1}}{m' \cdot g} = 9,8 \text{ m} \text{ et } h_2 = 67 \text{ m}.$$

Les énergies cinétiques du camion, dont la masse est environ dix fois plus grande, sont environ 10 fois plus grandes. Les hauteurs de chute correspondantes sont identiques.

$$h = \frac{\Delta E_{C1}}{m \cdot g} = \frac{1}{2} m \cdot \frac{v^2}{m \cdot g} = \frac{v^2}{2g} : \text{ la masse n'intervient pas.}$$

4. Pour atteindre $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, la hauteur de chute est de 9,8 m, soit environ 10 m ; cela correspond à trois étages plutôt qu'à quatre étages.

9. a. Lors d'une chute libre, la variation de l'énergie cinétique est égale au travail du poids.

Soit A la position du centre d'inertie G de la bille lâchée à la vitesse $v_A = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, à l'altitude $z_A = 2 \text{ m}$.

Soit B la position de G à l'altitude maximale z_B quand la vitesse v_B de la bille est nulle.

$$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g \cdot (z_A - z_B), \text{ soit l'altitude maximale atteinte } z_B = z_A + \frac{v_A^2}{2g} ;$$

$$z_B = 2 + \frac{10^2}{2 \times 10} = 7 \text{ m}.$$

b. Soit z_C l'altitude au niveau du sol ($z_C = 0$) et v_C la vitesse à ce niveau :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_C^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = m \cdot g \cdot (z_B - z_C).$$

Avec $v_B = 0$ et $z_C = 0$, on obtient :

$$v_C^2 = 2 \cdot g \cdot z_B = 140 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}.$$

et

$$v_C = 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Remarque : on peut aussi utiliser que l'énergie mécanique se conserve au cours d'une chute libre :

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z = \text{constante}.$$

10. a. La boule, une fois lancée, est en chute libre. La boule est lâchée à la vitesse $v_A = 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et à l'altitude $z_A = 2,0 \text{ m}$. À l'altitude maximale atteinte est z_B , la vitesse de la boule est v_B .

$$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g \cdot (z_A - z_B),$$

$$\text{soit : } v_B^2 = 2g \cdot (z_A - z_B) + v_A^2 ;$$

$$\text{d'où : } v_B = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} ;$$

le vecteur vitesse a une direction horizontale.

b. Soit z_C l'altitude au niveau du sol ($z_C = 0$) et v_C la vitesse à ce niveau :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_C^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g \cdot z_A - m \cdot g \cdot z_C.$$

Avec $z_C = 0$, on obtient $v_C^2 = 2 \cdot g \cdot z_A + v_A^2$;

$$\text{d'où : } v_C = 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Remarque : on peut aussi utiliser que l'énergie mécanique se conserve au cours d'une chute libre :

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z = \text{constante}.$$

11. 1. La variation d'énergie cinétique est :

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = 0,5 \times 9,7 \times 10^3 \times \left(\frac{360}{3,6}\right)^2 = 4,85 \times 10^7 \text{ J}.$$

2. $\Delta E_C = W(\text{forces})$; soit $W(\text{forces}) = 4,85 \times 10^7 \text{ J}$.

3. Les travaux du poids et de la réaction du sol sont nuls ; on admet que la seule force qui travaille est la force du réacteur si on néglige les frottements :

$$W = F \cdot \ell ; F = \frac{4,85 \times 10^7}{260} = 1,865 \times 10^5 \text{ N},$$

$$\text{soit } F = 1,9 \times 10^5 \text{ N}.$$

12. On admet que sur le document $2,3 \text{ cm} \rightarrow 10 \text{ cm}$.

$$1. v_A = \frac{1 \times 10}{2,3} = 65 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} ;$$

$$v_B = \frac{1,9 \times 10}{2,3} = 1,0 \times 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$2. \Delta E_{CAB} = \frac{1}{2} m \cdot (v_B^2 - v_A^2) ; \Delta E_{CAB} = 0,19 \text{ J}.$$

3. a. Le mobile est soumis à la force constante $\vec{F}$, à son poids $\vec{P}$ compensé par la réaction $\vec{R}$ du coussin d'air.

b. D'après le théorème de l'énergie cinétique :

$$E_C = \Sigma W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}}).$$

Or seule la force $\vec{F}$ travaille : $W_{AB} = F \cdot AB$;

$$AB = 3,0 \times \frac{10}{2,3} = 13 \text{ cm};$$

$$W_{AB} = 1,7 \times 0,13 = 0,22 \text{ J}.$$

On peut admettre que le théorème de l'énergie cinétique est vérifié.

13. 1. L'enfant est soumis à son poids $\vec{P}$, à la réaction du toboggan avec une composante normale $\vec{N}$ perpendiculaire au déplacement et avec une composante $\vec{f}$ parallèle et opposée au mouvement, modélisant la résultante des forces de frottement.

2. D'après le théorème de l'énergie cinétique

$$E_{CB} - E_{CA} = \Sigma W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}}) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{N});$$

$E_C(A) = 0 \text{ J}$ et $W_{AB}(\vec{N}) = 0 \text{ J}$, car $\vec{N}$ est perpendiculaire au déplacement.

$$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = m \cdot g \cdot h = 17 \times 10 \times 3 = 5,1 \times 10^2 \text{ N}.$$

$$\text{D'où } v_B^2 = 2 g \cdot h = 2 \times 10 \times 3,0;$$

$$v_B = 7,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ soit } 28 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1};$$

Cette vitesse serait très importante et la prise de contact avec le sol serait douloureuse!

$$\mathbf{3.} \quad E_C(B) - E_C(A) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{N}) + W_{AB}(\vec{f})$$

$$W_{AB}(\vec{f}) = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - m \cdot g \cdot h = 17 \times \left(\frac{2^2}{2} - 10 \times 3,0 \right) \\ = -17 \times 28 = -4,8 \times 10^2 \text{ N}.$$

$$\mathbf{4.} \quad W_{AB}(\vec{f}) = -f \cdot L \text{ avec } L = \frac{h}{\sin \alpha};$$

$$f = \frac{-(W_{AB}(\vec{f}) \cdot \sin \alpha)}{h} = \frac{(4,8 \times 10^2 \times \sin 45^\circ)}{3,0};$$

$$f = 1,1 \times 10^2 \text{ N et } \frac{f}{P} = \frac{1,1 \times 10^2}{1,7 \times 10^2} = 0,6 : \text{ ces deux forces sont du même ordre de grandeur.}$$

$$\mathbf{14. 1. a.} \quad E_p = m \cdot g \cdot z.$$

Au niveau du cinquième étage chez monsieur Durand, $z = 15 \text{ m}$ et $E_p = 200 \times 10 \times 15 = 3,0 \times 10^4 \text{ J}$.

Au dernier étage $z = 24 \text{ m}$; $E_p = 4,8 \times 10^4 \text{ J}$.

b. $\Delta E_p = m \cdot g \cdot \Delta z$; avec $\Delta z = 9 \text{ m}$, on obtient $\Delta E_p = 200 \times 10 \times 9 = 1,8 \times 10^4 \text{ J}$.

2. a. Son énergie potentielle est nulle lorsque l'ascenseur passe devant M. Durand puisque c'est l'origine de l'énergie potentielle. Au dernier étage $z = 9 \text{ m}$; $E_p = 1,8 \times 10^4 \text{ J}$.

La variation de l'énergie potentielle sera la même pour passer du cinquième étage au huitième, car la dénivellation Δz est la même.

b. L'énergie potentielle d'un solide dépend de l'origine de l'énergie potentielle, en revanche la variation de l'énergie potentielle entre deux positions ne dépend pas de cette origine.

15. 1. Le travail de la force de traction doit être au moins égal à la variation d'énergie potentielle :

$$W \geq \Delta E_p = m \cdot g \cdot h; \quad W \geq 50 \times 10 \times 10 = 5,0 \times 10^3 \text{ J} \text{ avec } g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

2. a. $\Delta E_p = E_p(B) - E_p(A)$ (valeur finale - valeur initiale).

b. Avec l'origine en A : $z_A = 0 \text{ m}$ et $z_B = -10 \text{ m}$;

$$\Delta E_p = m \cdot g \cdot z_B - m \cdot g \cdot z_A = -m \cdot g \cdot h = -5,0 \times 10^3 \text{ J}.$$

c. Cette variation d'énergie potentielle ne dépend pas de la position de l'origine O sur l'axe $(z'z)$, car quelle que soit cette origine, la variation d'altitude $z_B - z_A$ est la même.

16. 1. a. Lorsque le bloc se détache, sa vitesse est nulle. Son énergie cinétique est donc nulle.

b. Choisissons $E_p = 0 \text{ J}$ au niveau du rocher où le bloc de glace va s'écraser. Cela revient à prendre l'origine de l'axe (Oz) (vertical, ascendant), au niveau du rocher.

Lorsque le bloc se détache, son ordonnée $z = 500 \text{ m}$. Son énergie potentielle $E_p = m \cdot g \cdot z$ est donc égale à :

$$E_p = 1,5 \times 10^3 \times 9,8 \times 500 = 7,35 \times 10^6 \text{ J}.$$

2. Au cours de la chute, la vitesse du bloc augmente et son ordonnée z diminue. L'énergie cinétique augmente, alors que son énergie potentielle diminue.

3. Au cours de sa chute le bloc n'est soumis qu'à son poids (la résistance de l'air est négligeable). Le poids travaille, car le déplacement de son point d'application, noté $\vec{AB}$, n'est pas perpendiculaire à la direction de cette force.

4. a. Lors d'une chute libre, la variation d'énergie potentielle est égale à l'opposée de la variation d'énergie cinétique. Cela se traduit par $\Delta E_p = -\Delta E_C$.

b. Si A est le point de départ du bloc et B le point d'arrivée (point d'impact sur le rocher), la relation précédente s'écrit :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_A^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = -(m \cdot g \cdot z_A - m \cdot g \cdot z_B).$$

$$\text{Or } v_A = 0 \text{ et } z_B = 0 \text{ m; donc } \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = m \cdot g \cdot z_A, \text{ soit } v_B^2 = 2 \cdot g \cdot z_A.$$

Numériquement, avec $z_A = 500 \text{ m}$ et $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, on en déduit $v_B = 99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 360 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

En fait la vitesse est plus faible, car sur le rocher il s'exerce des forces de frottement.

$$\mathbf{17. 1.} \quad \text{Au sommet } S \text{ de la piste } E_{p_S} = 0, \\ E_{M_S} = E_{C_S} = \frac{1}{2} m \cdot v_S^2;$$

$$\text{d'où } v = \frac{20}{3,6} = 56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \quad E_{C_S} = 5,40 \times 10^3 \text{ J}.$$

2. En bas de la piste (point B) : $E_{M_B} = E_{C_B} - m \cdot g \cdot h$, car avec $E_{p_B} = -m \cdot g \cdot h$ après une descente de hauteur h .

3. L'énergie mécanique se conserve en l'absence de frottement : $E_{M_B} = E_{M_S}$, d'où $E_{C_S} = E_{C_B} - m \cdot g \cdot h$.

$$E_{C_B} = 5,4 \times 10^3 + 350 \times 9,8 \times 125 = 4,34 \times 10^5 \text{ J}.$$

$$E_{C_B} = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2; \quad v_B = 49,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ soit } 179 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

$$\mathbf{4.} \quad \text{On peut admettre que } \Delta E_M = W_{\text{force de frottement}}, \\ \left(\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 + E_{p_B} \right) - \left(\frac{1}{2} m \cdot v_S^2 + E_{p_S} \right) = W_{\text{force de frottement}}$$

$$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - m \cdot g \cdot h - \frac{1}{2} m \cdot v_S^2 = W_{\text{force de frottement}}$$

$W_{\text{force de frottement}} = -2,39 \times 10^5 \text{ J}$. Ce signe est négatif, car les forces de frottement sont des forces qui s'opposent au mouvement : leur travail est résistant.

18. 1. Pour parcourir 16,7 m à $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, la durée est $\Delta t = 16,7 \times \frac{3,6}{60} = 1,0 \text{ s}$.

À $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $\Delta t = 25 \times \frac{3,6}{90} = 1,0 \text{ s}$, on a la même

durée. Cet intervalle de temps n'est pas le même pour tous les conducteurs : cela dépend de la santé, de l'âge, de l'absorption de drogue (alcool, médicaments...), de l'usage d'un téléphone portable...

2. a. La distance de freinage peut dépendre de l'état de la route, des pneus, des freins...

b. $\Delta E_C = -F \cdot L$;

$$\Delta E_C = -0,5 \times 1000 \times \left(\frac{60}{3,6}\right)^2 = 1,4 \times 10^5 \text{ J}.$$

À $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$: route sèche : $F = 6,0 \times 10^3 \text{ N}$; route mouillée : $F = 3,0 \times 10^3 \text{ N}$.

À $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$: route sèche : $F = 6,0 \times 10^3 \text{ N}$; route mouillée : $F = 3,0 \times 10^3 \text{ N}$.

c. D'après le théorème de l'énergie cinétique

$$F \cdot L = \frac{1}{2} m \cdot v^2, \text{ donc la distance de freinage } L = D_F$$

est bien proportionnelle à v^2 ; cela est valable pour tous les véhicules si le rapport $\frac{F}{m}$ est le même. On

$$\text{vérifie que } \frac{v^2}{D_F} = \text{cte}; \frac{60^2}{23} \approx \frac{90^2}{52} = 1,6 \times 10^2.$$

$$\mathbf{19. 1. } W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h = 5 \times 10 \times 10 = 5,0 \times 10^2 \text{ J}.$$

$$\mathbf{2. } \Delta E_p = -W_{AB}(\vec{P}) = -5,0 \times 10^2 \text{ J}.$$

3. Lors d'une chute libre, la seule force appliquée à l'épée est son poids et $\Delta E_C = -\Delta E_p = 5 \times 10^2 \text{ J}$.

4. D'après le théorème de l'énergie cinétique,

$$v^2 = \frac{2E_C}{m} = \frac{5 \times 10^2}{5} = 10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{et } v = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

$$\mathbf{20. 1. a. } W_{AB}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h = -100 \times 10 \times 500 = -5,0 \times 10^5 \text{ J}.$$

b. Ce travail, de valeur négative, est résistant.

2. Lorsque le rocher est poussé, son altitude augmente et son énergie potentielle de pesanteur augmente aussi.

3. Considérons un axe ($z'z$) vertical ascendant avec z_A la cote du centre d'inertie G au bas de la pente et z_B la cote de G en haut de la pente : $h = z_B - z_A$, d'où $\Delta E_p = m \cdot g \cdot h$; on a : $\Delta E_p = 5,0 \times 10^5 \text{ J}$.

$$\mathbf{21. 1. a. } v = 300,80 \times 1,605 = 482,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}; v = 482,8/3,6 = 134,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. La vitesse moyenne est égale à $v_m = \frac{d}{\Delta t}$ soit :

$$v_m = \frac{400}{4,855} = 82,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. a. L'énergie cinétique du dragster est égale à

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2,$$

$$\text{soit } E_C = \frac{1}{2} \times 600 \times (134,1)^2 = 5,40 \times 10^6 \text{ J}.$$

b. Le travail de la force est égale à la variation d'énergie cinétique, donc $W = 5,40 \times 10^6 \text{ J}$.

$$\mathbf{c. } \text{La puissance moyenne est telle que } \mathcal{P}_m = \frac{W}{\Delta t}; \mathcal{P}_m = \frac{5,40 \times 10^6}{4,855} = 1,11 \times 10^6 \text{ W}.$$

En ch : $\mathcal{P}_m = 1,5 \times 10^3 \text{ ch}$, soit deux fois plus importante que celle d'une F1.

3. Les parachutes permettent de freiner rapidement le dragster et donc de diminuer rapidement l'énergie cinétique du véhicule, car $\Delta E_C = W(\text{force de freinage}) < 0$.

$$\mathbf{22. 1. } h = L \cdot \sin 30^\circ; h = 50 \text{ m}.$$

2. Les deux wagons sont reliés par un câble qui reste tendu; la vitesse de chaque extrémité du câble relié à chaque wagon est la même; il en est de même des deux wagons en translation.

$$\mathbf{3. a. } \Delta E_M = \Delta E_C + \Delta E_p.$$

Pour le wagon qui descend : $\Delta E_{C1} = \frac{1}{2}(m_0 + m_1) \cdot v^2$; son énergie potentielle diminue :

$$\Delta E_{p1} = -(m_0 + m_1) \cdot g \cdot \frac{h}{2}.$$

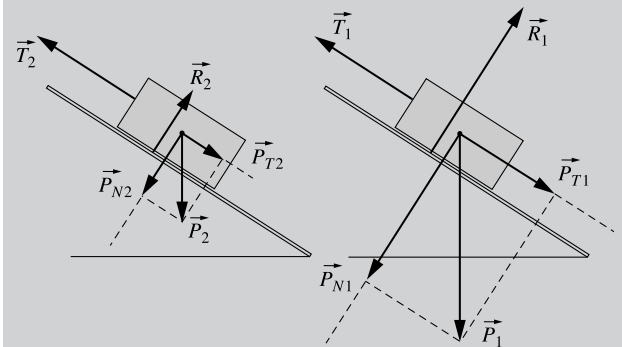
Pour le wagon qui monte : $\Delta E_{C1} = \frac{1}{2}(m_0 + m_2) \cdot v^2$; son énergie potentielle augmente :

$$\Delta E_{p1} = (m_0 + m_2) \cdot g \cdot \frac{h}{2}.$$

$$\Delta E_{M1} = \frac{1}{2}(m_0 + m_1) \cdot v^2 - (m_0 + m_1) \cdot g \cdot \frac{h}{2};$$

$$\Delta E_{M2} = \frac{1}{2}(m_0 + m_2) \cdot v^2 + (m_0 + m_2) \cdot g \cdot \frac{h}{2}.$$

b. Les wagons sont soumis à la tension $\vec{T}$ du câble, à leur poids $\vec{P}$ et à la force $\vec{R}$ exercée par les rails.



Pour le wagon qui descend, la composante du poids $\vec{P}_{T1}$ sur la direction parallèle à la pente et au câble doit être en valeur supérieure à celle $\vec{T}_1$ de la tension du câble. La composante $\vec{P}_{N1}$ est compensée par l'action des rails $\vec{R}_1$. La réaction $\vec{R}_1$ est perpendiculaire au rail, car on admet qu'il n'y a pas de frottement.

Pour le wagon qui monte, la composante du poids $\vec{P}_{T2}$ sur la direction parallèle à la pente et au câble doit être en valeur inférieure à celle $\vec{T}_2$ de la tension du câble. La composante $\vec{P}_{N2}$ est compensée par l'action des rails $\vec{R}_2$.

c. Appliquons le théorème de l'énergie mécanique à chaque wagon soumis à d'autres forces que le poids. Dans chaque cas, le travail des actions des rails sur

les wagons est nul, car elles sont perpendiculaires au déplacement.

$$\Delta E_M = W(\vec{T}) + W(\vec{R}).$$

$$\text{Donc } \Delta E_{M1} = W_1(\vec{T}_1)$$

$$= \frac{1}{2} (m_0 + m_1) \cdot v^2 - (m_0 + m_1) \cdot g \cdot \frac{h}{2} \quad (1)$$

$$\text{et } \Delta E_{M2} = W_1(\vec{T}_2)$$

$$= \frac{1}{2} (m_0 + m_2) \cdot v^2 + (m_0 + m_2) \cdot g \cdot \frac{h}{2} \quad (2)$$

d. On peut admettre que le câble permet de transférer de l'énergie mécanique entre les deux wagons. Si il n'y a pas d'autre force, on peut donc écrire que lorsque le wagon (1) descend, il fournit du travail au wagon (2) pour le faire monter : $W_2 > 0$ est moteur, $W_1 < 0$ est résistant, avec $|W_1| = |W_2|$, on a $W_2 = -W_1$.

e. D'après (1) et (2) et $W_2 = -W_1$, on peut écrire :

$$(2m_0 + m_1 + m_2) \cdot v^2 = (m_1 - m_2) \cdot g \cdot h.$$

4. D'après le résultat de la question **3.**, il faut que $m_1 > m_2$, car l'expression est $(2m_0 + m_1 + m_2) \cdot v^2 > 0$. Le travail du poids résistant à vide du wagon (2) qui monte est compensé par le travail moteur du poids à vide du wagon (1) à la descente. Le travail pour faire monter le wagon (2) est moins important. Il faut aussi un frein pour arrêter les wagons à l'arrivée si le wagon qui descend est plus chargé que celui qui monte.

5. Si $m_1 < m_2$, il faut alors fournir un travail supplémentaire pour faire monter le wagon 2; un moteur entraîne alors le câble en exerçant une force sur le câble; cette force fournit un travail moteur.

$$\mathbf{6.} \quad (2m_0 + m_1 + m_2) \cdot v^2 = (m_1 - m_2) \cdot g \cdot h;$$

$$\text{soit : } v^2 = \frac{200 \times 10 \times 50}{12200} \text{ et } v = 1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

23. 1. Voir le schéma ci-contre.

2. Altitude du point B :

$$z_B = AH = \ell - \ell \cdot \cos \alpha$$

$$= \ell (1 - \cos \alpha);$$

$$z_B = 1,0 \times (1 - \cos 45^\circ)$$

$$= 0,29 \text{ m}.$$

$$\mathbf{3.} \quad W_{BA}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot AH$$

$$= m \cdot g \cdot \ell (1 - \cos \alpha);$$

$$W_{AB} = 10 \times 10^{-3} \times 10 \times 1,0 \times (1 - \cos 45^\circ)$$

$$= 2,9 \times 10^{-2} \text{ J}.$$

4. La bille est soumise à son poids $\vec{P}$ et la force $\vec{T}$ exercée par le fil tendu.

5. Le centre d'inertie de la bille décrit une portion de cercle.

$\vec{T}$ a la direction du fil tendu. Le fil constitue le rayon de la trajectoire circulaire de la bille; aussi $\vec{T}$ reste perpendiculaire à la trajectoire. Le travail de $\vec{T}$ est donc nul.

$$\mathbf{6.} \quad E_{CA} - E_{CB} = \sum W_{BA}(\vec{F}) = W_{BA}(\vec{P}) + W_{BA}(\vec{T})$$

$$= m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot \ell (1 - \cos \alpha);$$

$$E_C(B) = 0 \text{ et } E_C(A) = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g \cdot \ell (1 - \cos \alpha);$$

$$v_A^2 = 2 g \cdot \ell (1 - \cos \alpha) \text{ et } v_A = 2,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\mathbf{7.} \quad W_{AC}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot \ell (1 - \cos \alpha_C) = -m \cdot g \cdot h_C.$$

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} m \cdot v_C^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = W_{AC} = -m \cdot g \cdot h_C;$$

or lorsqu'il rebrousse chemin en C la vitesse v_C est nulle, donc :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g \cdot h_C = m \cdot g \cdot h_B.$$

Donc $h_B = h_C$; Le point C a la même altitude que le point B.

On pouvait aussi appliquer la conservation de l'énergie mécanique entre le point B et le point C :

$E_M = E_M(A)$, soit : $E_p(B) = E_p(C)$, car l'énergie cinétique est nulle : $m \cdot g \cdot z_B = m \cdot g \cdot z_C$.

$$\mathbf{24. 1. a.} \quad E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

Au moment du largage, sa masse est :

$$M = 750 - 540 = 210 \text{ t};$$

$$E_C = 0,5 \times 210 \times 10^3 \times (240)^2 = 6,05 \times 10^9 \text{ J}.$$

$$\mathbf{b.} \quad E_p = m \cdot g \cdot h;$$

$$E_p = 210 \times 10^3 \times 9,8 \times 60 \times 10^3 = 1,23 \times 10^{11} \text{ J}.$$

$$\mathbf{c.} \quad E_M = E_p + E_C = 1,29 \times 10^{11} \text{ J}.$$

2. a. La poussée fournit un travail égal à : $W = F \cdot h$;
 $W = 11\,360 \times 10^3 \times 60 \times 10^3 = 6,8 \times 10^{11} \text{ J}.$

$$\mathbf{b.} \quad \mathcal{P}_m = \frac{W}{\Delta t}; \quad \mathcal{P}_m = 5,0 \times 10^9; \quad W = 5\,000 \text{ MW, soit}$$

près de six fois la puissance d'une centrale nucléaire.

c. Ce travail est cinq fois supérieur à l'énergie du dernier étage de la fusée, car il faut aussi communiquer de l'énergie aux boosters et aux carburants contenus dans les boosters.

25. 1. $W = \Delta E_C$ puisque la composante verticale de la résultante des forces qui s'exercent sur le skieur ne travaille pas : $W = 0,5 \times 70 \times \left(\frac{72}{3,6}\right)^2 = 1,4 \times 10^4 \text{ J}.$

$$\mathbf{2.} \quad W = F \cdot AB; \text{ d'où } F = \frac{W}{AB} \text{ et } F = 70 \text{ N}.$$

3. Appliquons le théorème de l'énergie cinétique :

$$E_C(C) - E_C(B) = W(\text{frottement}) + W(\text{poids});$$

$$W(\text{frottement}) = -f \cdot BC < 0;$$

$$W(\text{poids}) = -m \cdot g \cdot CH < 0.$$

$$\Delta E_C = -[500 \times 10 + 700 \times 5] = -8\,500 \text{ J}.$$

$$\frac{1}{2} m \cdot v_C^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = \Delta E_C;$$

$$v_C^2 = \frac{2 \cdot \Delta E_C}{m} + v_B^2; \text{ d'où } v_C = 12,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. Il est soumis à son poids :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_D^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_C^2 = W_{CD}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h_{CD},$$

on obtient $h_{CD} = 3,8 \text{ m}.$

La hauteur du point D par rapport à la surface de l'eau est donc $h_D = 8,8 \text{ m}.$

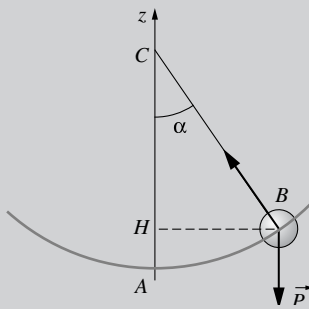
5. Appliquons le théorème de l'énergie cinétique entre D et le point M sur la surface de l'eau :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_M^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_D^2 = W_{DM}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h_{DM}$$

car le travail du poids est moteur.

$$v_M^2 = v_D^2 + 2 \cdot g \cdot h_{DM}; \text{ d'où } v_M = 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\mathbf{26. 1.} \quad m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$



2.

	Puce	Taupin	Criquet	Homme
E_c (J)	$9,8 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-2}$
v (m . s ⁻¹)	2,0	2,4	3,4	3,5
$\mathcal{P} = \frac{E_c}{\tau}$	1,2 mW	0,19 W	7,5 W	1,8 kW
$\mathcal{P}$ (W/kg)	25×10^2	$4,7 \times 10^2$	$3,2 \times 10^2$	26

27. Dans les données, on peut rappeler la force d'attraction gravitationnelle entre deux corps :

$$F = G \cdot m \cdot \frac{m'}{d^2}.$$

1. Pour l'astronaute, le petit pas sur la Lune n'était qu'un pas comme sur la Terre, mais cela présentait pour l'ensemble de l'humanité un événement historique puisque pour la première fois, l'Homme débarquait sur une Terre nouvelle.

2. 1 ch = 736 W, donc :

$$\mathcal{P} = 155 \times 10^6 \times 736 = 1,14 \times 10^{11} \text{ W}.$$

Il faut 127 réacteurs nucléaires pour produire une telle puissance.

3. a. Les forces de pesanteur sont assimilées aux forces de gravitation ; $F = m \cdot g$.

Force de gravitation exercée par la Terre sur un corps de masse m posé sur la surface de la Terre.

$$F_T = G \cdot M_T \cdot \frac{m}{R_T^2} = m \cdot g_T.$$

Force de gravitation exercée par la Lune sur un corps de masse m posé sur la surface de la Lune.

$$F_L = G \cdot M_L \cdot \frac{m}{R_L^2} = m \cdot g_L.$$

$$\text{Donc } \frac{g_L}{g_T} = \left(\frac{M_L}{M_T} \right) \left(\frac{R_T}{R_L} \right)^2 = \left(\frac{7,4 \times 10^{22}}{6,0 \times 10^{24}} \right) \left(\frac{6400}{1700} \right)^2 = 0,17.$$

b. $\frac{g_L}{g_T} = 0,17 \approx 0,2$, soit 20 % ; l'affirmation est donc vérifiée.

4. $\frac{1}{2} m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h$; h est la hauteur maximale atteinte.

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot h ; g_{\text{Lune}} = 1,7 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} ; g_{\text{Terre}} = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} .$$

5. a. La chute d'un objet sur la Lune est une chute libre, car il n'y a pas d'atmosphère, donc aucune force de frottement ; la seule force appliquée est la force de gravitation de la Lune.

b. On obtient une droite de type $v^2 = a \cdot d$.

c. Dans une chute libre $v^2 = 2 \cdot g \cdot d$; $a = 3,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

d. $g_L = 1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, soit proche de $1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Exercices complémentaires

Énoncés

1. Éboulement rocheux

Un bloc de rocher, de masse m , se détache de la falaise d'Étretat. À 20 m du sol, sa vitesse est égale à $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Quelle est sa vitesse à l'instant de l'impact sur le sol ?

Donnée : intensité de la pesanteur $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

2. Étude expérimentale d'une chute libre

1. a. Qu'appelle-t-on chute libre ?

b. Une bille d'acier lancée horizontalement tombe-t-elle en chute libre ? Pourquoi ?

2. On étudie la chute, sans vitesse initiale, d'une bille d'acier. Des capteurs reliés à une carte d'acquisition et un logiciel adapté, permettent de connaître la vitesse v pour une hauteur h de chute.

h (cm)	0	5,5	10,5	15,5	20,5	25,5	30,5
v (m . s ⁻¹)	0	1,05	1,45	1,76	2,02	2,26	2,47

a. Proposer un protocole de calcul ou de tracer un graphe pour vérifier que le travail du poids est égal à la variation de l'énergie cinétique de la bille.

b. Mettre en œuvre ce protocole pour cette expérience et calculer la valeur de g .

3. La balançoire

Une balançoire est constituée d'une nacelle suspendue par deux tiges. Elle porte un enfant. La masse de l'ensemble (nacelle + enfant) est de 50 kg.

On suppose que le centre d'inertie de l'ensemble est au milieu du segment $A'B'$ et que l'enfant reste immobile par rapport à la nacelle. On néglige les frottements.

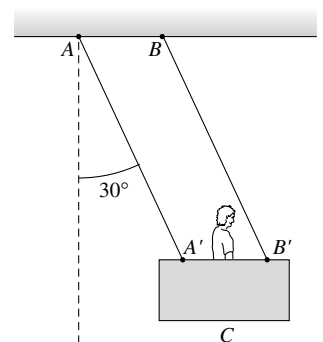
1. Quelle est la nature du mouvement de la nacelle abandonnée sans vitesse initiale dans la position indiquée sur le schéma ci-contre ?

2. Faire l'inventaire des forces agissant sur le système {nacelle + enfant}.

3. Quelle est la vitesse du centre d'inertie de l'ensemble au sommet de sa trajectoire ?

4. Quelle serait la valeur de sa vitesse au passage de la position la plus basse ?

Données : $AA' = BB' = L = 2 \text{ m}$; $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



4. Stand de kermesse

Dans un stand de kermesse, un solide, de masse $m = 10 \text{ kg}$ est guidé sur une ligne de plus grande pente d'un plan incliné faisant un angle $\alpha = 45^\circ$ par rapport à l'horizontale. Un capteur optoélectronique permet de connaître la valeur de la vitesse initiale v_0 . Le solide peut être projeté vers le haut.

Au cours d'un lancer, sa vitesse v_0 est égale à $6,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la distance parcourue sur le plan le long d'un guide avant de redescendre est égale à $\ell = 2,5 \text{ m}$.

1. Schématiser la situation.

2. Entre l'instant du lancer et l'instant où la vitesse s'annule, exprimer et calculer :

a. la variation d'énergie cinétique du mobile ;

b. le travail du poids.

3. a. Montrer que l'action du guide sur le solide comporte des forces de frottement.

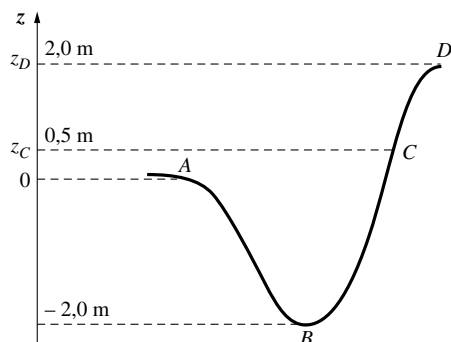
b. Évaluer la valeur de la force de frottement en admettant qu'elle reste constante au cours du déplacement.

4. Le solide redescend. Calculer sa vitesse en bas du plan en admettant que le travail des forces de frottement est le même qu'à la montée.

Donnée : intensité de la pesanteur $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

5. Skateboard.

Une piste pour skateboard a pour allure celle du schéma ci-dessous. L'ensemble S {enfant + skate} a une masse de 35 kg. La trajectoire représentée est celle du centre d'inertie de S , dans le plan vertical. On admet que, durant le mouvement sur la piste, l'ensemble S se comporte comme un solide en translation.



1. On néglige dans un premier modèle les forces de frottement.

a. Quelle doit être la valeur de la vitesse v_A au point A du centre d'inertie de S pour qu'il atteigne le point D?

b. Calculer alors la vitesse au point B.

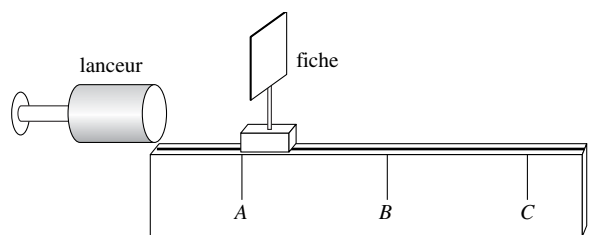
2. En fait avec la vitesse v_A calculée précédemment, l'ensemble S' n'atteint que le point C. Évaluer le travail des forces de frottement.

Donnée : intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

6. Les frottements de l'air

Un mobile, de masse $m = 180 \text{ g}$, est lancé sur un rail à coussin d'air horizontal. Ce mobile est muni d'une fiche cartonnée, placée perpendiculairement au rail, de masse négligeable et d'aire S . La vitesse du mobile est mesurée à la sortie A du lanceur, puis en deux autres points B et C tels que $AB = BC = 40 \text{ cm}$, à l'aide de capteurs opto-électroniques reliés à la carte d'acquisition d'un ordinateur. Les résultats expérimentaux sont les suivants :

Aire S (cm^2)	15	30
v_A ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0,28	0,28
v_B ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0,25	0,19
v_C ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0,23	0,14



1. Pourquoi peut-on considérer que les forces extérieures appliquées au mobile ne se compensent pas?

2. La somme des forces appliquées au mobile est-elle constante au cours du mouvement?

3. Montrer que la force de frottement due à l'air, dépend :

a. de l'aire de la fiche cartonnée ;

b. de la vitesse du mobile.

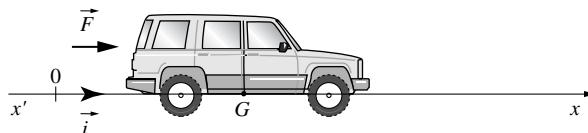
7. Mouvement d'une automobile (d'après Bac)

Une automobile, en panne de moteur, assimilable à un solide en translation, a une masse $M = 1,2 \text{ t}$. Elle est poussée par un véhicule de secours.

A. Le démarrage de l'automobile en panne sur une route rectiligne et horizontale commence par une phase d'accélération pendant laquelle le véhicule qui la pousse exerce une force constante F parallèle au déplacement et dirigée vers l'avant. Dans cette question, on admettra qu'aucune force ne s'oppose à l'avancement de l'automobile. On se propose d'étudier le mouvement du centre d'inertie G de l'automobile.

À la date $t = 0$, instant du démarrage, G se trouve à l'origine de l'axe O avec une vitesse nulle.

→ sens du mouvement de l'automobile



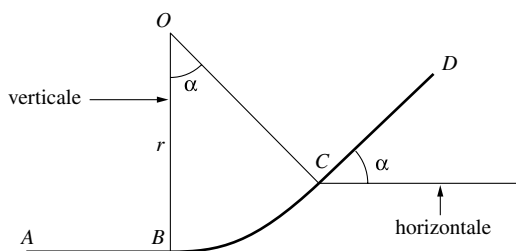
1. Effectuer le bilan des forces extérieures agissant sur l'automobile et les représenter appliquées en G .

2. L'automobile atteint la vitesse $v = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ après un parcours de 600 m.

a. Pourquoi l'énergie cinétique de l'automobile augmente-t-elle?

b. Après avoir appliqué le théorème de l'énergie cinétique à l'automobile, déterminer la valeur de la force F .

B. Après avoir effectué un parcours au cours duquel la voiture a atteint la vitesse de $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, la voiture est libérée de l'action de poussée au point A. Elle arrive alors sur une portion de route schématisée ci-dessous (le dessin n'est pas à l'échelle) :



• AB est rectiligne, parfaitement horizontal, de longueur L_1 .

• BC est circulaire de centre O de rayon $r = 100 \text{ m}$. OC fait un angle $\alpha = 15^\circ$ avec la verticale.

• CD est rectiligne de longueur L_2 faisant un angle $\alpha = 15^\circ$ avec l'horizontale.

Dans toute cette partie, les frottements sont négligés, sauf sur la partie CD pour laquelle ils sont équivalents à une force f de valeur constante.

1. L'automobile arrive en B. Justifier, sans calculs, que la vitesse $v_B = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

2. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique au

véhicule, sur le tronçon BC , établir l'expression de la vitesse v_C en fonction de v_B , r , g et α .

3. Calculer numériquement v_C .

4. L'automobile s'arrête sur le tronçon CD après avoir parcouru une distance de 150 m. En utilisant le théorème de l'énergie cinétique, calculer la valeur de la force de frottement s'exerçant sur CD .

Donnée : $g = 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Corrigés

1. Le rocher est en chute libre. Résolvons ce problème avec la conservation de l'énergie mécanique.

Choisissons l'origine de l'axe (Oz) au niveau du sol, point de chute du rocher.

Au point A , $z_A = 20 \text{ m}$ et $v_A = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Au point B , $z_B = 0 \text{ m}$ et la vitesse est v_B , valeur que l'on recherche.

Le rocher n'étant soumis qu'à son poids, son énergie mécanique est constante :

$$E_C(A) + E_p(A) = E_C(B) + E_p(B).$$

D'où : $E_C(B) = E_C(A) + E_p(A) - E_p(B)$.

$$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 + m \cdot g \cdot (z_A - z_B).$$

Simplifions par m :

$$\frac{1}{2} \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} v_A^2 + g \cdot (z_A - z_B);$$

d'où : $v_B = (v_A^2 + g \cdot (z_A - z_B))^{1/2}$.

Soit : $v_B = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. 1. a. Chute au cours de laquelle la seule force exercée sur le solide est le poids.

b. Oui, car on peut négliger les forces de frottement et considérer qu'elle n'est soumise qu'à son poids.

2. a. $\Delta E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ et $W(P) = m \cdot g \cdot h$, donc le tracé

de $v^2 = f(h)$ doit être une droite passant par l'origine, de pente $2 \cdot g$.

b. On obtient $g \approx 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3. 1. La balançoire est en mouvement de translation circulaire.

2. Le poids et les deux tensions des fils.

3. La vitesse du centre d'inertie est nulle au sommet de la trajectoire.

4. Appliquons le théorème de l'énergie cinétique :

$\Delta E_C = W(\vec{P})$, car les forces exercées par les filins ne travaillent pas, leur direction étant perpendiculaire au déplacement des points A' et B' .

$$W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos \theta_0) = \frac{1}{2} m \cdot v^2 - 0;$$

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos \theta_0) \text{ avec } \theta_0 = 30^\circ;$$

$$v = 2,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\mathbf{4. 2. a.} \Delta E_C = -\frac{1}{2} m \cdot v^2 = -211 \text{ J}.$$

$$\mathbf{b.} W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin \alpha = -177 \text{ J}.$$

3. a. La variation d'énergie cinétique est différente du travail du poids, car les forces de frottement effectuent un travail.

$$\Delta E_C = W(\vec{P}) + W(\vec{f}),$$

$$\text{donc } W(\vec{f}) = -211 + 177 = -34 \text{ J}.$$

$$\mathbf{b.} W(\vec{f}) = -F \cdot \ell = 34 \text{ J}; \text{ d'où } F = 14 \text{ N}.$$

$$\mathbf{5. 1. a.} \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g \cdot h; \text{ d'où } v_A = (2 \cdot g \cdot h)^{1/2}$$

avec $h = 2 \cdot m \cdot v_A = 6,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\mathbf{b.} \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = 2 \cdot g \cdot h'; \quad h' = 2 \text{ m}; \text{ d'où } v_B = 8,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\mathbf{2.} \Delta E_C = \frac{1}{2} m \cdot v_C^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = W(\vec{P}) + W(\vec{f})$$

$$\text{or } v_C = 0 \text{ donc } W(\vec{P}) = -\frac{1}{2} m \cdot v_A^2 - \frac{1}{2} W(\vec{f}).$$

On a vu dans la question 1. que $\frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = m \cdot g \cdot z_D$

et $W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot z_C$, donc :

$$W(\vec{f}) = -m \cdot g \cdot (z_D - z_C)$$

$$W(\vec{f}) = -525 \text{ J}.$$

6. 1. Les forces de frottement de l'air sur la fiche sont importantes.

2. Si la somme des forces extérieures était constante, le travail de ces forces serait le même sur les tronçons égaux AB et BC , or ce travail est égal à la variation d'énergie cinétique.

Étudions l'expérience réalisée avec la fiche cartonnée de 15 cm^2 , nous obtenons :

$$E_{CB} - E_{CA} = -8,0 \times 10^{-3} \text{ J};$$

$$E_{CC} - E_{CB} = -4,8 \times 10^{-3} \text{ J}.$$

Les travaux des forces appliquées au mobile sont différents sur les tronçons AB et BC . La somme des forces n'est donc pas constante.

Un raisonnement analogue peut être conduit avec la fiche cartonnée de 30 cm^2 . On obtient :

$$E_{CB} - E_{CA} = -21,0 \times 10^{-3} \text{ J};$$

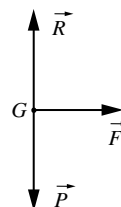
$$E_{CC} - E_{CB} = -8,2 \times 10^{-3} \text{ J}.$$

3. a. La diminution de l'énergie cinétique est plus importante avec une surface plus grande.

b. La variation de l'énergie cinétique est plus faible à faible vitesse.

Donc la force de frottement due à l'air augmente avec la surface de la fiche cartonnée et diminue avec la vitesse.

7. A. 1.



2. a. La résultante des forces est dans le sens du déplacement, donc la vitesse augmente.

$$\mathbf{b.} \Delta E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = F \cdot L, \text{ d'où } F = \frac{1}{2} m \cdot \frac{v^2}{L}$$

avec $v = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $F = 0,28 \text{ kN}$.

B. 1. La résultante des forces est nulle, donc $\Delta E_C = 0$; la vitesse est constante.

$$\mathbf{2.} v_C^2 = -2 g \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha) + v_B^2.$$

$$\mathbf{3.} v_C = 52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

4. Appliquons le théorème de l'énergie cinétique entre C et D :

$$\frac{1}{2} m \cdot v_D^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_C^2 = -f \cdot L + W(\vec{P})$$

avec f valeur de la force de frottement et $L = CD$,
or $v_D^2 = 0$ et $W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha$;

$$\text{d'où : } f = \frac{1}{2} m \cdot \frac{v_C^2}{L} - m \cdot g \cdot \sin \alpha;$$

$$f = 0,84 \text{ kN.}$$

Compléments scientifiques

Le théorème de l'énergie cinétique appliqué à un solide en mouvement quelconque dans un référentiel galiléen s'énonce ainsi :

La variation d'énergie cinétique d'un solide dans un référentiel galiléen est égale au travail de toutes les forces extérieures s'exerçant sur ce solide, le travail étant exprimé dans le référentiel galiléen :

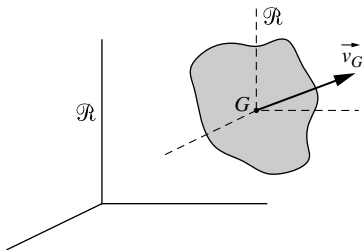
$$\Delta E_C = \Sigma (\vec{F}_{\text{ext}})_i.$$

L'énergie cinétique comporte deux termes (théorème de Kœnig) :

– l'énergie cinétique du centre de masse G affecté de toute la masse :

$$E_{CG} = \frac{1}{2} M V_G^2;$$

– l'énergie cinétique du mouvement de rotation autour de G dans le repère barycentrique : E_C^* .



Le repère barycentrique a ses axes constamment parallèles à ceux du repère galiléen et a son origine en G : il est animé d'un mouvement de translation par rapport au repère galiléen :

$$E_C = E_{CG} + E_C^*.$$

L'énergie cinétique barycentrique peut être calculée

à partir du moment cinétique $\vec{\sigma}_G$ du solide par rapport à G :

$$E_C^* = \frac{1}{2} \vec{\sigma}_G \cdot \vec{\Omega},$$

$\vec{\Omega}$ désignant le vecteur de rotation du solide.

On démontre que le moment cinétique du solide par rapport à G est le même dans le référentiel galiléen et dans le référentiel barycentrique, c'est la raison pour laquelle nous ne précisons pas le référentiel de calcul pour $\vec{\sigma}_G$.

$$\text{Par ailleurs, } \vec{\sigma}_G = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = J(\vec{\Omega}),$$

I_1 , I_2 et I_3 désignant les moments principaux d'inertie du solide dans le repère d'origine G ; Ω_1 , Ω_2 et Ω_3 représentant les composantes du vecteur rotation selon les axes principaux d'inertie.

$\vec{\sigma}_G$ résulte donc de l'application d'un opérateur inertie J sur $\vec{\Omega}$, d'où la notation $\vec{\sigma}_G = J(\vec{\Omega})$.

Dans les exercices élémentaires, le solide est animé, dans le repère barycentrique, d'un mouvement de rotation autour d'un axe de direction fixe passant par G . De plus, cet axe est axe de symétrie, donc axe principal d'inertie.

Le moment cinétique G se simplifie : $\vec{\sigma}_G = I \cdot \vec{\Omega}$.

I désignant le moment d'inertie par rapport à cet axe. On remarque que $\vec{\Omega}$ est porté par l'axe de rotation. Toujours dans ce cas particulier :

$$E_C^* = \frac{1}{2} I \cdot \Omega^2.$$

Nous constatons, dans le cas du mouvement quelconque du solide, que :

$$\Delta E_{CG} \neq \Sigma W(\vec{F}_{\text{ext}})_i.$$

C'est la raison pour laquelle il est dangereux d'appliquer le théorème de l'énergie cinétique sans précaution pour un solide en mouvement quelconque.

Bibliographie

Ouvrages

- J.-P. DURANDEAU, *Mécanique*, Édiscienc.
- J.-M. BREBEC, *H Prépa Mécanique I et II*, Hachette.

Transferts d'énergie et énergie interne

chapitre 7 physique

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

II. Forces, travail et énergie

B. Travail mécanique et énergie

3. Le transfert thermique

Objectifs

Pour illustrer le fait que le travail n'est pas le seul mode de transfert d'énergie, on termine l'introduction sur la partie « B. Travail mécanique et énergie » par quelques considérations simples sur le transfert thermique, en évitant la confusion entre chaleur et température.

Contenus

3. Le transfert thermique

Un travail reçu peut produire une élévation de température d'un corps. Une élévation identique de température peut être obtenue par transfert d'énergie sous une autre forme : le transfert thermique ; aspect microscopique.

Autre mode de transfert énergétique : le rayonnement.

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Savoir qu'à l'échelle macroscopique, un transfert thermique se fait spontanément du système dont la température est la plus élevée vers celui dont la température est la plus basse.
- Prévoir sur des exemples simples le sens d'un transfert thermique.
- Savoir que le rayonnement est un mode de transfert d'énergie.

Exemples d'activités

- Approche qualitative de la mise en contact de deux corps à des températures différentes : évolution vers l'équilibre thermique.
- Analyse qualitative des transferts d'énergie se faisant sur un système déterminé.

La conclusion de l'analyse présentée dans le chapitre s'exprimera sous la forme suivante : à tout système dans un état donné, on peut associer une grandeur appelée

« énergie ». Si l'énergie d'un système augmente ou diminue, c'est que le système a reçu ou cédé de l'énergie, que ce soit par travail, par transfert thermique ou par rayonnement.

Commentaires

Un autre mode de transfert d'énergie : le transfert thermique

En apportant de l'énergie par travail mécanique ou électrique (plus tard pour ce dernier point) on peut chauffer un corps, d'où l'idée qu'en général à une élévation de température correspond une énergie stockée plus importante.

On s'appuie ensuite sur l'étude de situations simples dans lesquelles un système voit son énergie évoluer (par exemple, un corps chaud qu'on laisse refroidir au contact de l'air atmosphérique ou un corps froid placé au voisinage d'une source chaude). On définit alors un deuxième mode de transfert d'énergie : le transfert thermique (cette expression sera utilisée de préférence au terme de chaleur pour éviter la confusion trop fréquente entre chaleur et température).

On indique qu'à l'échelle macroscopique ce transfert d'énergie s'effectue spontanément du système dont la température est la plus élevée vers celui dont la température est la plus basse. On se limite dans cette première approche au transfert thermique par conduction. Cette notion de transfert thermique sera réinvestie dans l'enseignement de S.V.T.

Il a été vu en classe de Seconde que la température est la variable macroscopique rendant compte de l'agitation des molécules d'un gaz. Le transfert thermique est un mode de transfert désordonné qui s'interprète à l'échelle microscopique par des transferts d'énergie lors d'interactions concernant des particules situées à l'interface entre le système et son environnement.

Le transfert d'énergie ne fait ici l'objet que d'une approche simple et qualitative à partir d'exemples courants (Soleil, lampe, ...).

Approche du principe de conservation de l'énergie

On pourra conclure cette partie en présentant le principe de conservation de l'énergie sous la forme : à tout système dans un état donné, on peut associer une grandeur appelée « énergie ».

Si l'énergie d'un système augmente ou diminue, c'est qu'il a reçu ou cédé de l'énergie que ce soit sous la forme de travail, de transfert thermique ou de rayonnement.

Cours

➤ Activité 1

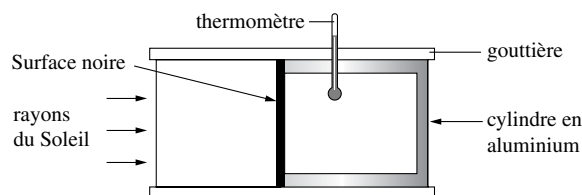
- Un bécher rempli d'eau.
- Une plaque chauffante.
- Un thermomètre, éventuellement interfaçable.
- Un chronomètre.
- Un ordinateur avec tableur (ou à défaut une feuille de papier millimétré).

➤ Activité 2

- Tiges métalliques constituées de métaux différents (de même section et de même longueur) montées sur un support.
- Un peu de cire.
- Un moyen de chauffage.
- Un chronomètre.
- Pour des lycées anciens, l'appareil d'Ingenhousz.

Rechercher et expérimenter

- Un cylindre creux à l'intérieur duquel se trouve un petit cylindre d'aluminium.
- Une lampe halogène.
- Un thermomètre, éventuellement interfaçable.
- Un chronomètre.
- Un ordinateur avec tableur (ou à défaut une feuille de papier millimétré).



Déroulement du chapitre

➤ Objectifs

- Savoir que l'énergie reçue sous forme de travail peut être « stockée » par un corps sous forme d'énergie interne.
- Connaître le transfert thermique.
- Savoir que le rayonnement est un mode de transfert d'énergie.
- Aborder la notion de conservation de l'énergie.

Activités préparatoires

A. L'automobile à air comprimé, utopie ou automobile idéale pour la ville ?

Réponses aux questions

1. Les forces pressantes exercées par l'air comprimé provoquent le déplacement des pistons.
2. Les forces pressantes exercées par l'air comprimé fournissent un travail aux pistons et leur communiquent de l'énergie sous forme cinétique.
3. Il a été nécessaire de comprimer l'air des réservoirs et d'utiliser pour ce faire une source d'énergie éventuellement polluante.

B. Comment détecter des fuites thermiques ?

Réponses aux questions

1. Un rayonnement infrarouge est constitué de radiations (électromagnétiques) dont la (les) longueur(s) d'onde dans le vide est(sont) supérieure(s) à celle de la lumière visible.
2. Les parties les plus chaudes sont les fenêtres vitrées et la toiture.
3. Elles sont plus chaudes, car elles sont en contact avec l'intérieur chaud de la maison. De plus, elles assurent une conduction de l'énergie thermique, meilleure pour le verre des vitres que pour le toit.
4. L'utilisation d'isolants thermiques (laine de verre, laine de roche, polystyrène expansé...) permet de diminuer les fuites thermiques.

Cours

La progression choisie a pour objectif de réactiver certaines connaissances sur les forces (poids et réaction d'un support), d'en faire émerger de nouvelles (forces de frottement et poussée d'ARCHIMÈDE) et d'utiliser le principe d'inertie pour trouver les caractéristiques des forces inconnues.

1. Existe-t-il d'autres formes d'énergie ?

Dans les chapitres précédents, on s'est intéressé aux conséquences macroscopiques d'un transfert d'énergie sous forme de travail : modification de son énergie potentielle de pesanteur et/ou de son énergie cinétique. On montre désormais que le travail reçu par un corps peut aussi le déformer, élever sa température ou le faire changer d'état. Ceci revient à modifier alors au niveau microscopique les énergies cinétiques d'agitation des particules ou les interactions entre ces particules ; ces deux formes d'énergie constituent l'énergie interne du corps que l'on ne connaît pas généralement, mais dont on pourra déterminer les variations.

2. Comment s'effectue un transfert thermique ?

Dans ce paragraphe, on s'intéresse aux effets d'un transfert thermique et aux différents modes de transferts thermiques : la conduction et la convection.

Un questionnement pourra être proposé aux élèves :

- *Pour l'ancrage dans le quotidien :*

Pourquoi et comment isoler une maison d'habitation ?

Citer des exemples d'isolants thermiques.

Comment sont-ils constitués ?

Qu'est-ce qu'un double vitrage ?

- *Pour parvenir à expliciter le phénomène de transfert :*

À quoi est reliée la température au niveau microscopique ?

Comment expliquer que deux corps, de températures différentes, mis en contact atteignent la même température ?

Quels facteurs permettent à ces températures d'évoluer ?

➤ Activité 1

Réponse à la question

L'énergie interne de l'eau augmente, car en contact avec

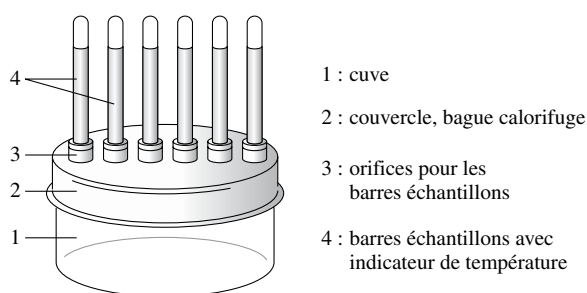
la plaque chauffante, les molécules d'eau reçoivent de l'énergie thermique et accroissent leurs énergies cinétiques microscopiques.

> Activité 2

Réponses aux questions

2. Le meilleur conducteur thermique est celui qui permet des transferts thermiques les plus rapides, ici le cuivre plus que le laiton et le fer; ceci est confirmé par les valeurs des conductivités thermiques, d'autant plus faibles que le matériau est conducteur.

Remarque : Cette expérience peut être aussi réalisée à l'aide de l'appareil d'Ingenhousz. Ce grand classique des collections de physique permet de comparer qualitativement la conduction thermique de divers matériaux. Il a été modernisé et peut posséder des indicateurs de températures placés à l'extrémité des barres échantillon.



Conductivités thermiques :

Cuivre :	env. $400 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.
Aluminium :	env. $200 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.
Laiton :	env. $90 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.
Fer :	env. $50 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.
Verre :	env. $0,8 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.
Bois :	env. $0,2 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

3. Qu'est-ce qu'un transfert d'énergie par rayonnement ?

À partir de phénomènes observés au quotidien, on découvre un autre mode de transfert d'énergie, le rayonnement (ondes électromagnétiques). Un rappel de Seconde sera fait sur la lumière visible, les radiations et les longueurs d'ondes λ pour situer les rayonnements U.V. et I.R. Un lien avec le cours de S.V.T. de Seconde permettra de rappeler l'émission de rayonnement par les corps chauds et l'absorption de rayonnement par la matière (atmosphère); l'effet de serre pourra être évoqué.

4. Comment définir l'énergie d'un système ?

On définit l'énergie d'un système comme étant la somme de son énergie mécanique et de son énergie interne.

Si l'énergie d'un système augmente ou diminue, c'est qu'il a reçu ou cédé de l'énergie, que ce soit sous la forme de travail, de transfert thermique ou de rayonnement.

5. Comment évaluer une variation d'énergie interne ?

La relation $Q = m \cdot L$ est utilisée en chimie (voir le chapitre sur les effets thermiques liés aux transformations de la matière).

La relation $Q = m \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1)$ ne figure pas explicitement au programme. Nous avons tenu à l'introduire afin de pouvoir faire quelques applications quantitatives sur les échanges thermiques *sans cependant insister trop* sur la calorimétrie.

Remarque : Il ne faudrait plus parler de chaleur, ce mot n'apparaît ni dans le programme ni dans les commentaires, il est néanmoins utilisé dans le langage courant dans d'autres disciplines et tout particulièrement en S.V.T. En physique-chimie, on parlera plutôt de transfert thermique, d'énergie reçue et d'énergie cédée.

Rechercher et expérimenter

1. Équilibre thermique de la Terre

Réponses aux questions

1. Quand un système est à l'équilibre thermique, sa température reste constante. Les échanges thermiques doivent se compenser : la somme des énergies reçues est égale à la somme des énergies cédées.

2. Le rayonnement infrarouge est un rayonnement électromagnétique invisible de longueur d'onde $\lambda > 700 \text{ nm}$ (au-dessus du visible mais en dessous de 1 mm , car au-delà ce sont les micro-ondes).

3. Lors de l'absorption d'un rayonnement lumineux par un corps, ce dernier reçoit de l'énergie, donc son énergie interne va augmenter, ce qui peut avoir différentes conséquences dont l'élévation de sa température.

4. L'évaporation de l'eau est un changement d'état qui nécessite de l'énergie. Pour que l'eau s'évapore à la surface de la Terre, il faut qu'elle reçoive de l'énergie; c'est le sol qui lui en fournit. Perdant de l'énergie, le sol (la Terre) se refroidit.

5. $D = K + L$, donc $K = 350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$C = G + H$, donc $H = 168 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

6. Énergie reçue par l'atmosphère :

$E + F + G + K = 78 + 24 + 67 + 350 = 519 \text{ J (par m}^2 \text{ et par s)}$.

L'énergie cédée est égale à l'énergie reçue :

$M + I = 519 \text{ J}$; d'où $M = 195 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

7. Au niveau du sol et des océans, les énergies reçues sont : $H + I = 492 \text{ J (par m}^2 \text{ et par s)}$; les énergies cédées sont : $E + F + D = 492 \text{ J (par m}^2 \text{ et par s)}$, de sorte que $H + I = E + F + D$. On vérifie qu'il y a bien équilibre thermique.

2. Mesure d'une puissance émise par rayonnement

Réponses aux questions

1. Tracé.

2. À partir du graphe tracé : $\theta(^{\circ}\text{C}) = 1,4 t(\text{min}) + 18$.

3. La puissance est :

$$\mathcal{P} = 0,09762 \times 896 \times \frac{1,4}{60} = 2,04 \text{ W}.$$

4. À partir du graphe tracé :

$$\theta(^{\circ}\text{C}) = 0,68 t(\text{min}) + 22,6.$$

5. La puissance est :

$$\mathcal{P} = 0,09762 \times 896 \times \frac{0,68}{60} = 0,99 \text{ W}.$$

S'autoévaluer

1. 1. Système : ressort. L'énergie interne augmente, car l'énergie potentielle élastique augmente (interaction microscopique entre les constituants du ressort).

2. Système : air. L'énergie interne augmente, car l'énergie potentielle d'interaction microscopique augmente (interaction microscopique entre les molécules constituant l'air), il peut aussi y avoir une augmentation de température si la compression est rapide, donc une variation de l'énergie cinétique des molécules.

3. Système : lame de scie. L'énergie interne augmente par échauffement dû aux frottements (augmentation de l'énergie cinétique microscopique des constituants de la lame).

4. Système : neige. L'énergie interne augmente par changement d'état (fusion de la neige), car l'énergie potentielle d'interaction entre les molécules d'eau augmente.

5. Système : météorite. L'énergie interne augmente par échauffement dû aux frottements (interaction microscopique entre les constituants du ressort).

2. 1. Le transfert thermique est symbolisé par une flèche partant de l'écrou vers l'eau, car l'écrou cède de l'énergie à l'eau.

2. La température de l'eau augmente et celle de l'écrou diminue.

3. L'énergie interne de l'écrou a diminué.

4. Le transfert thermique s'est effectué par conduction de l'écrou vers l'autre.

3. 1. La piscine échange de l'énergie thermique avec l'air et le sol et de l'énergie par rayonnement avec l'air et le Soleil.

2. La piscine cède de l'énergie thermique au sol et en reçoit de l'air. Elle cède de l'énergie par rayonnement à l'air et en reçoit du Soleil.

4. 1. À l'équilibre thermique, la température est intermédiaire avec les deux températures initiales, car l'eau s'échauffe et le bloc de fer se refroidit.

2. Variation d'énergie interne de l'eau :

$\Delta U = m \cdot c_{\text{eau}} (\theta - 18) > 0$; variation de l'énergie interne du bloc de fer.

$\Delta U' = m' \cdot c_{\text{fer}} (\theta - 80) < 0$. Le contenu du calorimètre étant isolé, sa variation d'énergie interne est nulle donc $\Delta U + \Delta U' = 0$ soit $\theta = 21^\circ\text{C}$.

Exercices

1. Le travail fourni par une force à un objet :

a. peut faire varier son énergie cinétique, mais peut faire varier aussi d'autres formes d'énergie;

b. peut faire varier son énergie potentielle de pesanteur;

c. permet parfois d'élever sa température; oui;

d. peut modifier la forme de l'objet;

e. peut provoquer un changement d'état; oui.

2. L'énergie interne d'un système est la somme des énergie cinétique et potentielle au niveau microscopique.

L'énergie interne d'un corps peut être modifiée par transfert de travail noté W , par transfert thermique noté Q ou par rayonnement noté W_R .

3. a. Un transfert thermique a lieu du corps chaud vers le corps froid.

b. Un transfert thermique permet de faire varier la température d'un corps, de le faire changer d'état ou de le déformer.

c. Le transfert thermique peut s'effectuer par conduction et/ou par convection. Lors de la convection, il y a déplacement de matière.

d. Le symbole utilisé pour le transfert thermique est Q .

e. Le transfert thermique ne peut s'effectuer dans le vide.

4. 1. Oui, un transfert d'énergie par rayonnement peut s'effectuer dans le vide.

2. Oui, un transfert d'énergie par rayonnement peut modifier l'énergie interne d'un corps puisqu'elle peut l'échauffer.

5. 1. L'énergie E d'un système est égale à la somme de son énergie interne et de son énergie mécanique.

2. L'énergie E d'un système est constante si celui-ci est énergétiquement isolé.

6. 1. Cette relation est utilisée quand il y a élévation de température sans changement d'état.

2. U est l'énergie interne du corps (en joule), m la masse du corps (en kilogramme), c est la capacité thermique massique (en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) et $\Delta\theta$ est la variation de température (en $^\circ\text{C}$).

3. Cette relation est utilisée lorsqu'il y a un changement d'état.

4. U est l'énergie interne du corps (en joule), m est la masse du corps (en kilogramme) et L est la chaleur latente massique de changement d'état (en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

7. Les effets du travail sont :

a. pour les morceaux de bois : une élévation de température;

b. pour l'arc : une déformation;

c. pour l'eau : un changement d'état.

8. 1. Le travail de la force exercée par le joueur est transformé en énergie potentielle microscopique.

2. L'énergie interne du ressort augmente quand le joueur tire sur le lanceur.

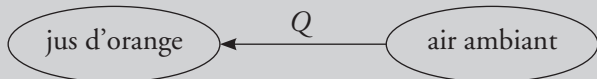
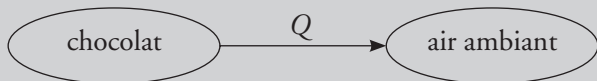
3. L'énergie interne du ressort diminue et la boule reçoit de l'énergie sous forme mécanique.

9. 1. Le jus d'orange frais (lorsque les glaçons ont fondu) verra sa température augmenter.

Le chocolat chaud verra sa température baisser.

2. L'énergie interne du jus d'orange augmente tandis que celle du chocolat baisse.

3. Schémas des transferts d'énergie :

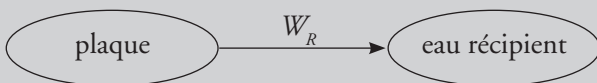


4. Le transfert thermique sera plus rapide si on souffle, car on crée des courants de convection et les échanges sont favorisés; il y a alors conduction et convection.

10. 1. Le système (eau + récipient) voit son énergie interne augmenter.

2. Il s'agit d'un transfert thermique par rayonnement.

3. Schéma du transfert :



11. 1. Au début, tant que la température de la boisson est une température inférieure à celle de l'air (soit 26 °C), elle reçoit de l'énergie thermique de l'air et de l'énergie par rayonnement du Soleil. Au-dessus de la température de l'air, elle cède de l'énergie thermique à l'air et continue de recevoir de l'énergie par rayonnement du Soleil.

2. À l'équilibre thermique de la boisson, les transferts n'ont pas cessé, ils se compensent.

12. 1. Le changement d'état de la cire est la fusion.

2. Le changement d'état est dû au transfert d'énergie par rayonnement.

13. a. Métallisées, les couvertures de survie assurent la réflexion des I.R. humains qui ne sont pas transmis à l'extérieur; plastifiées, elles transmettent un peu les transferts thermiques.

b. Noirs, les capteurs solaires absorbent mieux le rayonnement solaire, ce qui conduit à un gain d'énergie plus important.

c. Noires, les lunettes absorbent une partie du rayonnement solaire, ce qui protège les yeux.

d. Les I.R. de la boisson chaude se réfléchissent sur les parois métallisées de la bouteille et ne sont pas transmis vers l'extérieur.

e. Blancs, les murs absorbent peu le rayonnement solaire, ce qui limite leur échauffement et celui de la maison.

f. Recouvertes d'aluminium, les combinaisons des pompiers renvoient les I.R. des feux et limitent l'échauffement des corps.

14. 1. La température du sol ne varie pas, on peut donc considérer que l'énergie totale du sol est constante; il y a alors compensation entre les apports et les pertes d'énergie.

2. Le sol reçoit une puissance 170 + X et cède une puissance de 20 + 390 + 100 = 510 W, l'énergie X renvoyée par les nuages et l'atmosphère est 340 W pour 1 m² de sol.

15. 1. Le transfert se fait essentiellement par rayonnement.

2. a. L'énergie fournie à l'eau est :

$$\Delta U = m \cdot c(\theta_2 - \theta_1) = 6,0 \times 10^5 \text{ J.}$$

Le rendement du chauffage est de 35 %, l'énergie par les plaques est : $\frac{\Delta U}{0,35} = 1,72 \times 10^6 \text{ J.}$

b. $\mathcal{P} = \frac{\Delta U}{\Delta t}$, donc $\Delta t = \frac{1,72 \times 10^6}{1800} = 955 \text{ s}$, soit environ 16 minutes.

16. 1. 10 L d'eau ont une masse de 10 kg; donc $m = 10 \text{ kg}$.

$\theta_2 = 15 \text{ °C}$ et $\theta_1 = 100 \text{ °C}$;

d'où : $\Delta U_1 = 3,5 \text{ MJ.}$

2. $m = 10 \text{ kg}$; $L_{\text{vap}} = 2260 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

d'où : $\Delta U_2 = 22,6 \text{ MJ.}$

3. La variation d'énergie interne totale vaut **zéro**, car l'eau revient dans le même état. L'énergie interne de l'eau diminue ($\Delta U_3 + \Delta U_4 = -(\Delta U_1 + \Delta U_2) = -26,1 \text{ MJ}$); elle cède son énergie au système de refroidissement qui reçoit l'énergie :

$$E = -(\Delta U_3 + \Delta U_4) = 26,1 \text{ MJ.}$$

17. 1. 1 kWh = 3,6 × 10⁶ J, soit l'énergie économisée : $E = 1,26 \times 10^{12} \text{ J.}$

2. La masse d'eau chauffée est de $m = 8,6 \times 10^6 \text{ kg}$.

3. Les besoins sont de $249 \times 160 \times 365 = 14,5 \times 10^6 \text{ kg}$ d'eau, l'économie ne permet donc pas de couvrir tous les besoins en eau chaude.

18. 1. Il reçoit de l'énergie dans l'évaporateur.

2. Il cède de l'énergie dans le condenseur.

3. Il reçoit de l'énergie dans le compresseur.

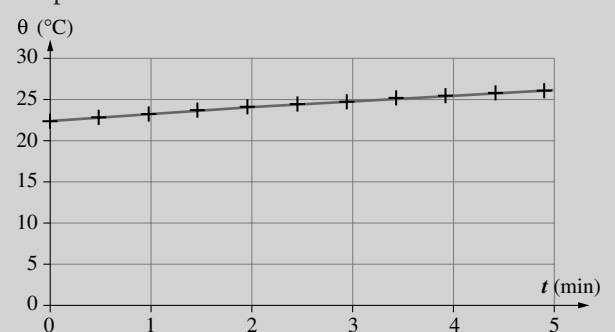
4. Le fluide est gazeux entre la source froide et le compresseur.

5. a. Il a fallu fournir 26 kJ pour faire fonctionner la pompe.

b. Les convecteurs auraient consommé 225 kJ.

c. Cette installation permet une économie de 225 kJ – 26 kJ = 199 kJ, on a en effet besoin de fournir une énergie plus faible que celle fournie à la source chaude, car on en prélève dans la source froide.

19. 1. a. Tracé de l'évolution de θ en fonction du temps.



b. La droite modélisant l'évolution de θ est :

$$\theta = 0,78 \cdot t + 22,4;$$

son coefficient directeur est :

$$0,78 \text{ °C} \cdot \text{min}^{-1} = 13 \times 10^{-3} \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. la puissance reçue par le cylindre est :

$$\mathcal{P} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = m \cdot c_{\text{Al}} \cdot \frac{\theta}{\Delta t} \text{ avec } \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \text{ coefficient directeur de la droite.}$$

$$\text{Soit } \mathcal{P} = 0,09762 \times 896 \times 13 \times 10^{-3}$$

$$= 1,13 \text{ W sur } 12,52 \text{ cm}^2, \text{ soit } 905 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

3. Pourcentage de flux de rayonnement solaire absorbé : $\frac{905}{1368} = 66 \%$.

20. 1. a.

2. b.

3. b.

4. a.

5. b. et c.

21. 1. Aux 100 km, la consommation énergétique est de 18 MJ.

2. Cette valeur est très inférieure à 238 MJ pour la voiture à essence.

3. Il faudrait $4,65 \times 10^{14}$ Wh pour toutes les voitures.

4. On suppose que les centrales continuent à produire de l'électricité utilisée à d'autres fins que de faire rouler les voitures. Une centrale produit 6,9 TWh, il faudrait donc 68 centrales pour faire fonctionner toutes les voitures à air comprimé.

5. Oui, les pollutions des véhicules à essence et gasoil seraient résolues, car les centrales nucléaires ne polluent pas l'atmosphère. En revanche, on augmenterait la quantité des déchets nucléaires.

22. 1. a. Les freins modifient l'énergie cinétique.

b. Le travail des forces de frottement est transféré au disque.

2. a. La quantité d'énergie transférée est la variation d'énergie cinétique $\Delta E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 - 0 = 1,16 \times 10^5 \text{ J}$.

b. On aurait $\Delta E = m \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta \theta$ soit $\Delta \theta = 28^\circ \text{C}$.

3. Les voitures de course étant plus rapides, les freins doivent dissiper plus d'énergie, donc supporter des échauffements plus importants.

4. On met de l'éther dans un tube de cuivre entraîné par la rotation d'un moteur, l'axe du tube étant confondu avec celui du moteur. On met le tube en rotation, on arrête le moteur et on freine le tube avec une pince en bois. On mesure la masse de l'éther volatilisé lorsque le tube est à l'arrêt.

23. 1. a. 1 cal = 4,18 J.

b. 1 BTU = 1 055 J.

c. 1 kWh = $3,6 \times 10^6 \text{ J}$.

2. Tableau de conversion :

	J	cal	BTU	kWh
J	1	0,239	$9,479 \times 10^{-4}$	$2,78 \times 10^{-7}$
cal	4,184	1	$3,966 \times 10^{-3}$	$1,163 \times 10^{-6}$
BTU	1 055	252,1	1	$2,933 \times 10^{-4}$
kWh	$3,6 \times 10^6$	$8,604 \times 10^5$	3 412	1

$$3. a. 1 \text{ BTU/h} = \frac{1055}{3600} = 0,29 \text{ W}.$$

b. Le climatiseur peut extraire :

$$0,29 \times 2 \times 3600 \times 18000 = 38 \text{ MJ}.$$

4. La valeur énergétique du jus d'orange est 192 kJ.

24. 1. Ces coefficients dépendent des matériaux utilisés lors de la construction ; en utilisant des isolants thermiques on diminue leur valeur.

2. Les transferts s'effectuent par conduction et par rayonnement, du corps chaud vers le corps froid.

3. Puissance transférée :

$$\text{— vers l'extérieur } (0,25 \times 110 + 0,3 \times 120 + 1,6 \times 30) (20 - (-8)) = 3,12 \text{ kW};$$

$$\text{— vers les locaux non chauffés } (0,4 \times 90)(20 - 5) = 0,54 \text{ kW};$$

$$\text{— vers le sol } (0,4 \times 30)(20 - 0) = 0,24 \text{ kW};$$

$$\text{— par infiltration d'air } 0,32 \times 0,3 \times 360 \times (20 - (-8)) = 0,97 \text{ kW};$$

— du corps chaud vers le corps froid (ici vers l'extérieur de l'habitation).

4. a. La puissance thermique globale nécessaire vaut 4,87 kW.

b. Pour compenser les pertes, on ajoute 15 %, soit $\mathcal{P} = 5,6 \text{ kW}$.

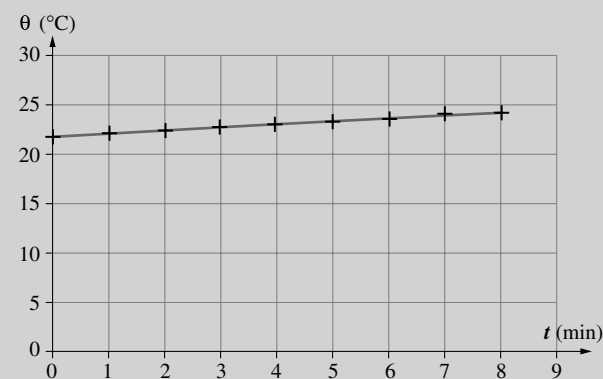
25. A. 1. a. Voir le schéma de l'énoncé.

b. On mesure l'ombre portée h d'un bâton de hauteur H . L'angle α est tel que $\tan \alpha = \frac{H}{h}$.

2. a. On observe l'ombre portée du thermomètre qui doit être minimale.

b. Voir le schéma.

3. Courbe représentant l'évolution de la température en fonction du temps :



1. a. La plaque de verre permet d'éviter les transferts thermiques par convection avec l'extérieur.

Le polystyrène sert à isoler thermiquement le bloc de laiton de l'extérieur (à limiter les transferts thermiques).

b. Au début, il faut le temps de chauffer tout le laiton dans sa masse par conduction thermique.

2. a. $k = 0,33^\circ \text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

b. Soit $\Delta \theta = \frac{k}{60} = 5,5 \cdot 10^{-3}^\circ \text{C}$ par seconde.

3. a. La variation d'énergie interne du laiton est $\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta \theta$.

- b. Sa valeur est $\Delta U = 0,238 \times 370 \times 5,5 \cdot 10^{-3} = 0,48$ J par seconde.
4. Le bloc de laiton reçoit de l'énergie du Soleil par rayonnement, il perd un peu d'énergie vers le milieu extérieur par conduction thermique.
5. L'énergie transférée par le rayonnement solaire est donc pratiquement égale à la variation d'énergie interne du laiton, soit 0,44 J par seconde.
6. La puissance rayonnée est de $\mathcal{P}_r = 240$ W par m^2 .

Exercices complémentaires

Énoncés

1. Chauffage solaire

Une installation de chauffage solaire comporte un capteur solaire orienté vers le Sud et incliné à 45° par rapport à l'horizontale. La surface du capteur est $S = 5 \text{ m}^2$. Le transfert par rayonnement solaire est de 800 J par seconde et par m^2 de capteur pendant une durée de 6 h en période chaude.

1. Le capteur absorbe 80 % de l'énergie rayonnante qu'il reçoit.
Calculer l'énergie absorbée pendant les 6 h prises en compte.
2. Les pertes du capteur sont estimées à 450 J par m^2 et par seconde.
 - a. Évaluer les pertes énergétiques sur la même durée.
 - b. Indiquer sous quelles formes et par quels processus ces pertes sont transférées à l'environnement.
 - c. En déduire la quantité d'énergie utile.
3. En fait, grâce à une pompe, une circulation d'eau est établie dans le capteur avec un débit $D = 21 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. En régime permanent, la température du capteur est stationnaire, car l'excédent d'énergie est transféré à l'eau pendant qu'elle circule entre l'entrée et la sortie du capteur.
 - a. Indiquer pourquoi on a intérêt à faire arriver l'eau par la partie inférieure du capteur.
 - b. Établir l'expression littérale reliant la puissance du transfert thermique à l'eau ou puissance utile, la puissance absorbée par le capteur et la puissance dissipée par les pertes.
 - c. Calculer la variation de la température de l'eau entre son entrée dans le capteur et sa sortie.
 - d. En déduire la température de l'eau en sortie sachant que la température à l'entrée est $\theta_e = 20^\circ\text{C}$.
4. a. L'eau portée à la température θ_s circule dans un serpentin immergé dans le ballon d'un chauffe-eau. Quelle est la puissance thermique de celui-ci en régime stationnaire?
- b. Pourquoi la tuyauterie est-elle calorifugée?
- c. Le serpentin doit-il être en matière plastique ou en acier inoxydable?

Données :

1 L d'eau pèse 1 kg ; $c_{\text{eau}} = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

2. Étude d'un chauffe-eau électrique

1. Une publicité concernant un chauffe-eau d'appoint précise :

« Complément du chauffe-eau principal... Particulièrement recommandé lorsque le chauffe-eau principal se trouve à plus de 8 mètres du robinet à alimenter. »

Donner une explication physique pour justifier ce judicieux conseil.

2. Un chauffe-eau électrique instantané à accumulation, présente les caractéristiques suivantes : « Puissance 2000 W ; il chauffe en 30 minutes et à 65°C , 15 L d'eau prise à 15°C . »

- a. Calculer l'énergie nécessaire pour chauffer ce volume d'eau dans ces conditions (capacité thermique massique de l'eau $c = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).
- b. Quelle est alors la puissance utile?
- c. En déduire le rendement du chauffe-eau.
3. En utilisant un chauffe-eau solaire supposé de même rendement et dont le capteur a une surface de $1,5 \text{ m}^2$, calculer le temps nécessaire pour chauffer la même quantité d'eau :
 - a. un jour très ensoleillé, pour lequel la puissance reçue par le capteur est de 900 W par m^2 ;
 - b. un jour plus couvert, pour lequel la puissance reçue n'est que de 300 W par m^2 .
 - c. Commenter les résultats.
 - d. Comment se nomme le mode de transfert d'énergie dans un chauffe-eau solaire?
4. On utilise l'eau de ce chauffe-eau pour obtenir 100 L d'eau à 35°C pour prendre un bain. Quelle quantité d'eau sortant du chauffe-eau doit-on utiliser avec de l'eau froide à 15°C ?

Corrigés

1. 1. $\mathcal{P}_r = 800 \times 5 \times 0,80 = 3200 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ ou W, soit 3,2 kW.
 $W_r = 3,2 \times 6 = 19,2 \text{ kWh}$.
2. a. $W_p = 0,45 \times 5 \times 6 = 13,5 \text{ kWh}$.
b. Les pertes énergétiques sont transférées à l'environnement par transfert thermique et par rayonnement. Les processus des transferts sont la conduction et la convection pour la chaleur et les ondes électromagnétiques pour le rayonnement.
c. $W_u = W_r - W_p$, soit $W_u = 19,2 - 13,5 = 5,7 \text{ kWh}$.
3. a. Parce qu'en se réchauffant, l'eau monte, sa masse volumique diminuant, et on soulage la pompe.
b. $\mathcal{P}_r = \mathcal{P}_p + \mathcal{P}_u$,
soit $\mathcal{P}_u = \mathcal{P}_r - \mathcal{P}_p = 3,2 - 2,2 = 1 \text{ kW}$.
d. $\theta_s = 61^\circ\text{C}$.
4. a. 1 kW.
b. Pour limiter les pertes vers le milieu extérieur.
c. En acier inoxydable afin d'augmenter les transferts par conduction.
2. 1. Le tuyau entre le chauffe-eau et le robinet contient de l'eau qui se refroidit entre deux utilisations peu rapprochées ; il faudra chaque fois évacuer cette eau pour obtenir l'eau chaude souhaitée. C'est un gaspillage, puisque cette eau a été chauffée inutilement.
La longueur du tuyau contribue aussi à abaisser la température de l'eau (par conduction) entre le chauffe-eau et le robinet.

$$2. a. Q = m \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) = 15 \times 4180 \times (65 - 15) = 3,1 \times 10^6 \text{ J.}$$

$$\mathcal{P} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{3,1 \times 10^6}{(30 \times 60)} = 1,7 \text{ kW.}$$

c. Rendement = puissance utile/puissance fournie :

$$\eta = \frac{1700}{2000} = 0,85 = 85 \text{ \%}.$$

3. a. La puissance totale reçue par le capteur est :

$$\mathcal{P} = 900 \times 1,5 = 1350 \text{ W;}$$

la puissance utile correspondante :

$$\mathcal{P}_u = 0,85 \times 1350 = 1150 \text{ W;}$$

$$\text{la durée nécessaire : } t = \frac{3,1 \times 10^6}{1,15 \times 10^3} = 2700 \text{ s} = 45 \text{ min.}$$

b. La durée nécessaire est trois fois plus grande, soit $t = 135 \text{ min}$ puisque la puissance reçue est trois fois moindre.

c. La durée est beaucoup plus grande avec un chauffe-eau solaire, mais l'énergie consommée est gratuite une fois que le coût de l'installation est amorti.

d. Rayonnement.

4. Le transfert d'énergie nécessaire pour chauffer la masse m_f d'eau froide est :

$$Q_a = m_f \cdot c \cdot (35 - 15).$$

Ce transfert est fourni par la masse m_c d'eau chaude se refroidissant :

$$Q_c = m_c \cdot c \cdot (65 - 35).$$

Avec $m_f = 10^5 - m_c$, il vient :

$$(10^5 - m_c) \cdot c \cdot 20 = m_c \cdot c \cdot 30, \text{ soit } m_c = 40 \text{ kg, soit } 40 \text{ L.}$$

Compléments scientifiques

1. Loi de Fourier

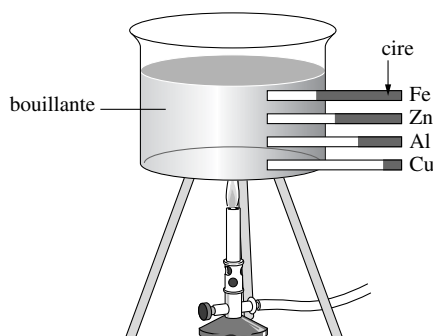
La non-uniformité de la température dans un système entraîne un transfert d'énergie, appelé transfert thermique (ou chaleur).

Lorsqu'il n'y a pas de convection, c'est-à-dire pas de déplacement global de matière, ce transfert est appelé diffusion thermique ou conduction thermique.

L'expérience de INGENHOUSZ (1789)

C'est la première expérience sur la diffusion thermique. Elle permet de comparer la diffusion thermique dans différents métaux.

Les longueurs de cire fondue permettent de comparer les conductivités thermiques des matériaux.



Loi de FOURIER (1815) (Préfet et physicien)

Un transfert thermique a lieu des zones chaudes vers les zones froides; c'est un transfert, non convectif, d'énergie interne entre ces deux zones.

Soit un corps homogène dont la température locale T ne dépend que de x (T est la même en tout point d'un plan perpendiculaire à un axe Ox).

Notons $J_Q(x)$ la densité volumique de flux thermique encore appelée densité volumique de courant thermique. $J_Q(x)$ représente l'énergie traversant par unité de temps une surface unité, d'abscisse x , orthogonale à Ox ; c'est une puissance thermique surfacique.

$$J_Q = \frac{1}{S} \cdot \frac{\delta Q}{\delta t} : J_Q \text{ s'exprime en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

L'intensité thermique, ou flux thermique, est donc égal à :

$$I_{th} = \iint_S \vec{J}_Q \cdot \vec{dS} ; I_{th} \text{ s'exprime en } \text{W}.$$

Expérimentalement, on constate que J_Q est d'autant plus intense que $\frac{\partial T}{\partial x}$ est plus grand. Si la variation spatiale de T n'est pas trop forte, il y a proportionnalité : c'est la loi de Fourier :

$$J_Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}.$$

$\lambda > 0$, coefficient caractéristique du matériau, est appelé conductivité thermique.

Le signe « - » indique que ce flux d'énergie est dirigé vers les températures décroissantes.

Quelques valeurs de λ en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$:

Ag : 418	verre : ≈ 1	eau : 0,60
Cu : 390	bois : 0,25 à 0,12	éthanol : 0,17
Al : 238	laine de verre : 0,04	
air (1 atm ; 300 K) : $2,7 \cdot 10^{-2}$	Fe : 82	

On constate que les métaux sont « bons conducteurs de la chaleur », l'air est un très bon isolant thermique.

Dans le cas général, la loi de FOURIER s'écrit :

$$\vec{J}_Q = -\lambda \vec{\text{grad}} T.$$

Équation de la diffusion thermique

Effectuons un bilan énergétique dans un volume cylindrique d'axe parallèle à Ox , de section S , de largeur dx . Supposons qu'à l'intérieur du milieu considéré il y ait des sources d'énergie interne microscopiques (effet Joule par passage d'un courant, par exemple). Notons que la puissance volumique d'énergie interne créée

(pour l'effet Joule $q_U = \frac{j^2}{\gamma}$; j densité volumique de courant électrique, γ conductivité électrique du milieu).

La conservation de l'énergie permet d'écrire que :

$$\text{énergie qui arrive} + \text{énergie créée} = \text{énergie qui part} + \text{énergie qui reste.}$$

L'énergie qui reste va provoquer une variation de température dT du système; en régime stationnaire, ce terme est nul.

$$S \cdot J_Q(x) \cdot dt + q_U \cdot S dx dt = S \cdot J_Q(x + dx) dt + S dx \rho c_v dT$$

$$J_Q(x) = J_Q(x + dx) - q_U dx + \rho dx c_v \frac{\partial T}{\partial t}.$$

$$-\frac{\partial J_Q}{\partial x} dx + q_U dx = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} dx;$$

$$\text{or } J_Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \text{ d'où :}$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_U = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t}; \text{ d'où, en posant } a = \frac{\lambda}{\rho c_v},$$

l'équation de la diffusion thermique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho c_v} q_U.$$

Remarques :

1. Cette équation n'est pas invariante par renversement du temps ($t \rightarrow -t$); la diffusion thermique est un phénomène irréversible.

2. En régime stationnaire et en l'absence de source :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \text{ (dans le cas général } \Delta T = 0).$$

Exemple :

Barre (vitre) dont les extrémités sont aux températures T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$); on néglige les pertes latérales.

Comment varie T en régime stationnaire?



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = k; \quad T = kx + b;$$

$$x = 0, T = T_1; \quad x = \ell, T = T_2 \Rightarrow T = (T_2 - T_1) \cdot \frac{x}{\ell} + T_1$$

2. Régime forcé continu : conductance et résistance thermique

Reprenons l'exemple précédent (barre latéralement isolée, reliée à deux sources de chaleur T_1 et T_2)

La puissance thermique qui traverse une section S de la barre est $I_{th} = J_Q(x) \cdot S$.

$$\text{Or } J_Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\ell}$$

$$I_{th} = \lambda \frac{T_2 - T_1}{\ell} \cdot S,$$

$$\text{soit : } T_1 - T_2 = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\ell}{S} I_{th}$$

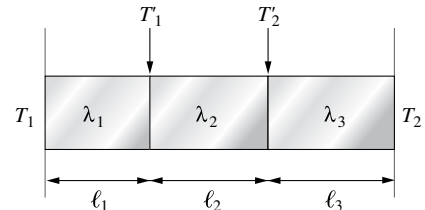
$$\text{analogue à } V_1 - V_2 = \frac{1}{\lambda} \frac{\ell}{S} I = RI \text{ en électricité.}$$

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \frac{\ell}{S} : \text{résistance thermique de la barre;}$$

$$G_{th} = \frac{\lambda S}{\ell} : \text{conductance thermique de la barre.}$$

$$\text{Donc } T_1 - T_2 = R_{th} \cdot I_{th} \text{ ou } I_{th} = G_{th} (T_1 - T_2).$$

• **Association série** (cas d'un double vitrage)



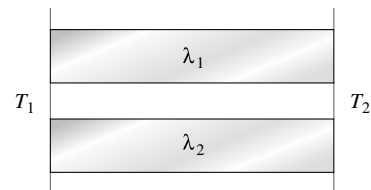
$$T_1 - T_1' = R_{th1} \cdot I_{th} \text{ avec } R_{th1} = \frac{1}{\lambda_1} \frac{\ell_1}{S}.$$

$$T_1' - T_2' = R_{th2} \cdot I_{th} \text{ (c'est le même flux thermique car on est en régime stationnaire).}$$

$$T_2' - T_2 = R_{th3} \cdot I_{th}.$$

$$\text{D'où } T_1 - T_2 = R_{th} \cdot I_{th} \text{ avec } R_{th} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3}.$$

• **Association en parallèle**



$$I_{th1} = G_{th1} (T_1 - T_2) \text{ et } I_{th2} = G_{th2} (T_1 - T_2);$$

$$\text{or } I_{th} = I_{th1} + I_{th2}, \text{ d'où :}$$

$$I_{th} = G_{th} (T_1 - T_2) \text{ avec } G_{th} = G_{th1} + G_{th2}.$$

Bibliographie

J.-M. BREBEC, *H Prépa Thermodynamique* 1^{re} année

Transferts d'énergie dans un circuit électrique

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

III. Électrodynamique

A. Circuit électrique en courant continu

1. Transfert d'énergie au niveau d'un générateur et d'un récepteur

Objectifs

Dans une première partie, on montre comment se transforme l'énergie dans un circuit électrique en soulignant l'importance de l'effet Joule, autant dans ses applications que dans ses inconvénients. À cette occasion, l'élève va réinvestir les connaissances sur l'introduction à l'énergie. L'approche énergétique est privilégiée, mais c'est aussi l'occasion de s'approprier certaines lois de l'électrocinétique.

Contenus

1. Transferts d'énergie au niveau d'un générateur et d'un récepteur

1.1 Énergie électrique W_e reçue par un récepteur, traversé par le courant I , pendant Δt :

$$W_e = (V_A - V_B) \cdot I \cdot \Delta t \text{ avec } U_{AB} = (V_A - V_B) > 0.$$

Puissance électrique du transfert : $\mathcal{P} = U_{AB} \cdot I$.

1.2 Effet Joule : applications

1.3 Énergie électrique transférée du générateur au reste du circuit pendant la durée Δt :

$$W_e = (V_P - V_N) \cdot I \Delta t$$

$(V_P - V_N) = U_{PN}$ désigne la différence de potentiel ou tension entre la borne positive et négative du générateur et I l'intensité du courant qui le traverse.

Puissance électrique du transfert : $\mathcal{P} = U_{PN} \cdot I$.

1.4 Bilan du transfert d'énergie pendant la durée Δt .

Un récepteur absorbe une énergie électrique $U_{AB} \cdot I \cdot \Delta t$, en « dissipe » une partie $r \cdot I^2 \cdot \Delta t$ et convertit le reste sous une autre forme (mécanique, chimique).

Un générateur transforme partiellement une forme d'énergie (mécanique, chimique) $E \cdot I \cdot \Delta t$ en énergie électrique disponible $U_{PN} \cdot I \cdot \Delta t$.

Le complément $r \cdot I^2 \cdot \Delta t$ est « dissipé » sous forme thermique par effet Joule.

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Utiliser le principe de conservation de l'énergie pour faire un bilan qualitatif au niveau d'un récepteur.
- Mesurer une différence de potentiel.
- Mesurer l'intensité d'un courant.
- Réaliser un circuit d'après un schéma conventionnel et dessiner le schéma d'un circuit réalisé.
- Savoir que l'effet Joule est un effet thermique associé au passage du courant dans un conducteur.
- Représenter sur un schéma une tension par une flèche.
- Savoir que, dans un circuit où il n'y a qu'un générateur, le potentiel électrique est une grandeur qui décroît de la borne positive vers la borne négative.
- Savoir que la grandeur « puissance électrique » permet d'évaluer la rapidité d'un transfert d'énergie.

Exemples d'activités

- Interpréter en termes de transferts d'énergie qu'une lampe brille, qu'une résistance s'échauffe, qu'un moteur tourne.
- Mesures de tensions et d'intensités dans un circuit série dans le but de calculer des grandeurs énergétiques.
- Mesure du potentiel électrique de différents points d'un circuit par rapport à celui d'un point choisi comme référence ; tracé d'un diagramme des potentiels le long d'un circuit.
- Inventorier quelques manifestations de l'effet Joule dans la vie courante.

Commentaires

Lors de l'étude des transferts d'énergie concernant un récepteur en régime permanent, l'approche du principe de conservation de l'énergie vue à la fin de la mécanique va permettre d'introduire simplement le fait que de l'énergie a nécessairement été transférée du générateur au récepteur. On utilise alors l'expression « d'énergie électrique transférée », notée W_e , de préférence à l'expression de « travail électrique » d'usage moins courant.

Pour les bilans, on utilise les conventions « récepteur » d'une part et « générateur » d'autre part. Les tensions sont automatiquement algébrisées, car elles se présentent comme des différences de potentiel. Comme seuls des circuits simples, parcourus par des courants continus, sont ici étudiés, le sens du courant est clairement identifié et l'algébrisation de l'intensité n'apparaît pas comme indispensable, l'intensité étant en pratique positive; ainsi W_c et $\mathcal{P}$ sont des grandeurs positives. Le professeur peut commencer à introduire l'algébrisation de l'intensité en précisant sur les schémas le sens d'orientation choisi pour le circuit, mais cela ne constitue absolument pas une exigence du programme.

On attire l'attention sur le fait qu'il n'y a transfert d'énergie que si la portion de circuit considérée est soumise à une tension différente de zéro et est traversée par un courant dont l'intensité n'est pas nulle.

On insiste sur l'omniprésence de l'effet Joule, en justifiant que dans certains cas cet effet est mis au rang des pertes (dans les générateurs par exemple ou les lignes de transport) et que dans d'autres il s'agit d'un effet utile. L'étude de l'effet Joule est aussi l'occasion de rencontrer un nouveau mode de transfert de l'énergie : le rayonnement, toujours associé aux effets thermiques et même dominant dans certains radiateurs électriques et les lampes.

Matériel

Cours

➤ Activité 1

- Un générateur de tension continue 6 V-12 V.
- Un moteur.
- Une lampe.
- Un électrolyseur.
- Une solution d'hydroxyde de sodium à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Deux tubes à essai pour coiffer les électrodes.
- Des fils.

➤ Activité 2

- Un générateur de tension continue réglable.
- Un interrupteur.
- Une lampe (6 V ; 0,6 W).
- Deux multimètres.
- Des fils.

Rechercher et expérimenter

- Un générateur de tension continue réglable de 0 V à 15 V.
- Deux multimètres.
- Un électrolyseur.
- Une solution d'hydroxyde de sodium à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Deux tubes gradués pour coiffer les électrodes.
- Des fils.

Déroulement du chapitre

Il s'agit d'aborder l'électrocinétique en étudiant les transferts énergétiques au niveau des dipôles constituant un circuit. Pour chaque dipôle, le bilan énergétique est réalisé à partir de sa loi de fonctionnement.

➤ Objectifs

- Mesurer et représenter les tensions et les intensités des courants dans un circuit.
- Savoir calculer la puissance et l'énergie reçues par un récepteur.
- Connaître l'effet Joule.
- Être capable d'effectuer un bilan énergétique au niveau d'un récepteur.

➤ Prérequis

- Notions de tension et d'intensité électriques.
- Notions de puissance et d'énergie électriques.
- Réaliser un circuit en série et un circuit dérivé.
- Utiliser un multimètre en voltmètre et en ampèremètre.

Activités préparatoires

A. Directement dans votre assiette !

Réponses aux questions

1. Le mixer contient nécessairement un moteur (entraînant un couteau qui broie les légumes) et un conducteur ohmique (résistance chauffante).
2. Les légumes reçoivent du travail mécanique (du moteur) et de la chaleur (de la résistance).
3. Cette énergie provient du générateur (énergie électrique); il s'agit ici de l'alimentation du secteur.

B. Peugeot H₂O, un prototype

Réponses aux questions

1. Au niveau macroscopique, une pile fournit de l'énergie électrique au circuit.
Au niveau microscopique, elle entretient un mouvement d'ensemble des charges mobiles dans le circuit (électrons dans les fils et ions dans les solutions).
2. La borne négative de la pile cède des électrons au circuit électrique; le réservoir associé est celui contenant le dihydrogène, car ce dernier donne des ions hydrogène (H^+) et des électrons.
3. Pôle négatif : $\text{H}_2 = 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$
Pôle positif : $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- = 4 \text{OH}^-$

Cours

1. Quels sont les transferts d'énergie dans un circuit électrique ?

Il s'agit de dégager les notions de générateur et de récepteur électrique en lien avec les différentes formes d'énergie rencontrées dans la partie précédente.

➤ Activité 1

Réponses aux questions

1. Lorsqu'on ferme l'interrupteur, la lampe brille et chauffe, le moteur tourne, des réactions chimiques se produisent aux électrodes de l'électrolyseur.
2. Le générateur fournit l'énergie électrique aux autres dipôles. Cette énergie est convertie :
 - dans la lampe, sous forme de chaleur et d'énergie de rayonnement;
 - dans le moteur, sous forme de travail et de chaleur;

– dans l'électrolyseur, sous forme d'énergie chimique et de chaleur.

Ces différentes énergies sont transférées au milieu extérieur.

3. Le générateur fournit l'énergie électrique au reste du circuit.

2. Comment représenter une tension électrique ?

Dans ce paragraphe, la notion de tension, déjà introduite au collège, est complétée avec son algébrisation et sa représentation par un segment fléché. Les conventions « générateur » et « récepteur » sont précisées.

3. Quelles sont les expressions de la puissance et de l'énergie électrique ?

Ce paragraphe précise les notions de puissance et d'énergie électriques.

➤ Activité 2

Réponse à la question

Si $U_{AB} = 6 \text{ V}$; $I = 0,1 \text{ A}$; $U_{AB} \cdot I = 0,6 \text{ W} = \mathcal{P}$ est la puissance nominale indiquée sur le culot de la lampe ; la lampe brille normalement.

Si $U_{AB} = 3 \text{ V}$. Le produit $U_{AB} \cdot I < \mathcal{P} = 0,6 \text{ W}$, la lampe brille plus faiblement.

4. Quel bilan énergétique peut-on effectuer pour chaque dipôle ?

Un bilan énergétique systématique est réalisé pour un conducteur ohmique, un électrolyseur ou un moteur et un générateur électrochimique, en établissant au préalable la loi de fonctionnement du dipôle. Cette partie peut donner lieu à un TP ; l'établissement de la loi de fonctionnement d'un électrolyseur est d'ailleurs détaillée dans la rubrique *Rechercher et Expérimenter*.

Rechercher et expérimenter

1. Un bus propre roulant à l'hydrogène

Réponses aux questions

1. Cette nouvelle technologie de moteur est considérée comme non polluante, car elle produit de l'eau.

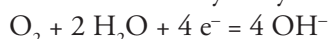
2. L'auteur nomme « hydrogène » et « oxygène » le dihydrogène et le dioxygène.

3. On ne trouve pas de dihydrogène dans la nature ; il est fabriqué dans une unité de reformage de gaz naturel (constitué d'hydrocarbures) qui équipe la station service.

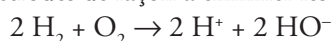
4. Au contact de l'anode, le dihydrogène se transforme en ions hydrogène et en électrons :



Les électrons produits à l'anode (borne –) partent vers le circuit électrique extérieur, ils sont captés par le dioxygène de l'air qui se transforme en ions HO^- à la cathode pour former des ions hydroxyde :



5. L'équation de la réaction chimique ayant lieu dans la pile à combustible est obtenue en additionnant les réactions aux électrodes de façon à éliminer les électrons :



Les ions formés se combinent pour donner de l'eau H_2O .

Ce bus est qualifié de « propre » puisqu'il ne produit que de l'eau.

6. Le bus parcourt $d = 200 \text{ km}$ à la vitesse moyenne $v = 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, son autonomie est environ :

$$\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{200}{40} = 5 \text{ heures.}$$

La puissance électrique de la pile étant de $\mathcal{P} = 205 \text{ kW}$, l'énergie électrique fournie par la pile est donc :

$$W = \mathcal{P} \cdot \Delta t$$

$$W = 205 \times 5 \times 3600 = 3,7 \times 10^6 \text{ kJ.}$$

7. En parcourant 200 km, l'autobus consomme environ 25 kg de dihydrogène. L'énergie électrique produite par kg de dihydrogène est donc :

$$\frac{W}{25} = 1,48 \times 10^5 \text{ kJ/kg} = 148 \text{ MJ/kg.}$$

Le « pouvoir calorifique » d'une essence classique étant d'environ 45 MJ/kg, le kilogramme de dihydrogène est énergétiquement plus intéressant, car une même masse fournit trois fois plus d'énergie.

8. L'usine de reformage fabrique 50 m³ de dihydrogène par heure.

Dans les conditions supposées, le volume molaire vaut :

$$V_m = \frac{RT}{\mathcal{P}} = \frac{8,31 \times (25 + 273)}{1,0 \cdot 10^5} = 2,48 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}.$$

La quantité de dihydrogène formé est donc :

$$n = \frac{V}{V_m} = \frac{50}{2,48 \times 10^{-2}} = 2,0 \times 10^3 \text{ mol.}$$

La masse formée en une heure est :

$$m = n \cdot M = 4,0 \times 10^3 \text{ g} = 4,0 \text{ kg.}$$

La durée nécessaire pour fabriquer 25 kg de dihydrogène est donc :

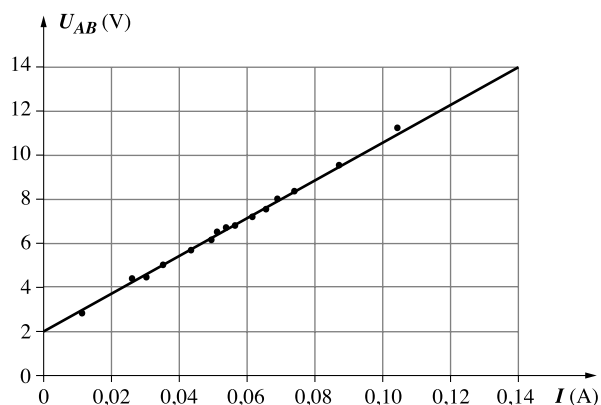
$$t = \frac{25}{4} = 6,25 \text{ heures, soit 6 h 15 minutes.}$$

2. Une électrolyse pour obtenir du dihydrogène

Réponses aux questions

1. Modélisation du comportement électrique de l'électrolyseur

1. Évolution de la tension U_{AB} en fonction de l'intensité I du courant : voir la courbe ci-dessous.



2. La caractéristique est linéaire et croissante : $U_{AB} = a \cdot I + b$ avec a et b positifs.

À l'aide d'une analyse dimensionnelle, on constate que

b est homogène à une tension tandis que a , dont le produit avec une intensité donne également une tension, est homogène à une résistance.

a est le coefficient directeur de la droite :

$$a = \frac{14 - 2}{0,14 - 0} = 86 \, \Omega;$$

b est l'ordonnée à l'origine : $b = 2,0 \, \text{V}$.

D'où : $U_{AB} = 86 \cdot I + 2,0$.

3. Par analogie avec le générateur : $U_{AB} = r \cdot I + E$ avec $r = 86 \, \Omega$, résistance interne et E , force électromotrice de l'électrolyseur.

4. Soumis à une tension $U_{AB} = 6 \, \text{V}$, l'électrolyseur est parcouru par un courant $I = 0,047 \, \text{A}$;

$$W_e = U_{AB} \cdot I \cdot \Delta t = 6 \times 0,047 \times 10 \times 60 = 169 \, \text{J}.$$

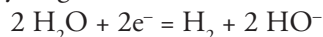
5. L'énergie perdue par effet Joule est :

$$W_J = r \cdot I^2 \cdot \Delta t = 86 \times 0,047^2 \times 600 = 114 \, \text{J}.$$

L'énergie utile est : $W_U = E \cdot I \cdot \Delta t = 2 \times 0,047 \times 600 = 56 \, \text{J}$.

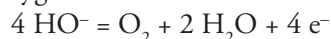
II. Étude du comportement chimique de l'électrolyseur

1. À l'électrode reliée à la borne - du générateur, il se forme du dihydrogène selon :



(H_2 est identifié par son aboiement à la flamme).

À l'électrode reliée à la borne + du générateur, il se forme du dioxygène selon :



(O_2 avive la flamme)

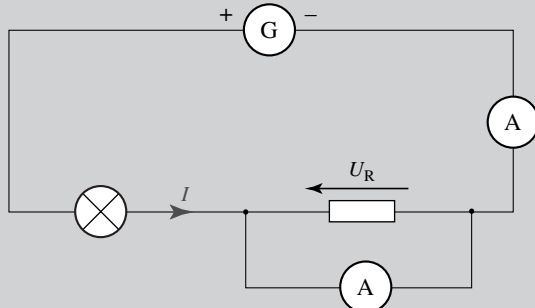
2. *Électrolyse* vient des mots grecs « êlektron » qui désigne l'ambre (aux propriétés électriques) et « lusis » qui signifie dislocation; cela signifie que l'on « brise grâce à l'électricité ». L'auteur de l'article du *Monde* parle d'*électrolyse inverse* pour la pile à combustible, car le bilan des réactions aux électrodes est modélisé par $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$; c'est-à-dire par la réaction inverse de celle de l'électrolyse : $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$.

3. Le rendement énergétique d'une électrolyse est faible, une grande partie de l'énergie électrique transférée à l'électrolyseur est dissipée par effet Joule.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. 1.



2. Le voltmètre mesure la tension aux bornes du conducteur ohmique : $U_R = 5,52 \, \text{V}$. Celle-ci est représentée par un segment fléché sur le schéma.

3. L'intensité mesurée est $I = 0,082 \, \text{A}$, soit $82 \, \text{mA}$ et son sens de circulation est indiqué sur le schéma.

2. 1. Puissance électrique fournie à la cuve :

$$\mathcal{P} = U \cdot I = 35\,000 \times 3,9 = 1,4 \times 10^5 \, \text{W}.$$

2. Énergie électrique fournie :

$$W = \mathcal{P} \cdot \Delta t = 35\,000 \times 3,9 \times 180 \times 24 = 5,9 \times 10^8 \, \text{Wh} = 5,9 \times 10^5 \, \text{kWh}$$

3. 1. Toute la puissance électrique reçue par le thermoplongeur est transférée au milieu extérieur par effet Joule :

$$W = \mathcal{P} \cdot \Delta t = 40 \times 4 \times 60 = 9,6 \times 10^3 \, \text{J}.$$

$$2. \mathcal{P} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R}, \text{ car } I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{R}.$$

Donc la valeur de la résistance est :

$$R = \frac{U_{\text{eff}}^2}{\mathcal{P}} = 1,3 \, \text{k}\Omega.$$

4. 1. Puissance fournie au moteur :

$$\mathcal{P}_e = U \cdot I = 172 \times 14,8 = 2,55 \, \text{kW}.$$

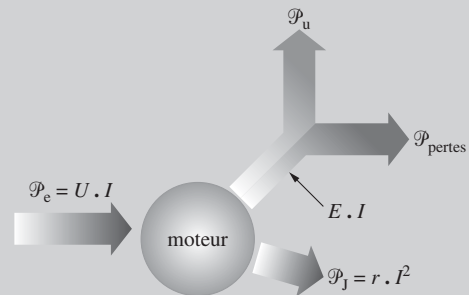
2. Rendement du moteur : $\rho = \frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_e} = \frac{2,0}{2,55} = 79 \, \%$.

3. Puissance Joule dissipée dans le moteur :

$$\mathcal{P}_J = r \cdot I^2 = 0,9 \times 14,8^2 = 0,20 \, \text{kW}.$$

4. La différence $(\mathcal{P}_e - \mathcal{P}_J - \mathcal{P}_u)$ représente la puissance perdue sous d'autres formes au sein du moteur (travail des forces de frottement au niveau de l'axe ou pertes d'origine magnétique).

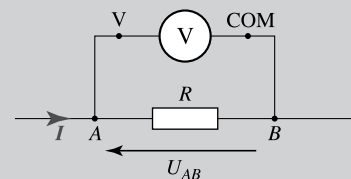
5.



Exercices

1. 1. a. Le voltmètre mesure U_{AB} .

b.



c. $U_{AB} > 0$.

2. 1. L'effet Joule est la conversion d'énergie électrique en énergie thermique dans un dipôle possédant une résistance.

2. $\mathcal{P} = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$; $\mathcal{P}$ en W, U en V, I en A et R en Ω .

3. $W = \mathcal{P} \cdot \Delta t = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$.

3. 1. F.é.m E en volt et résistance interne r en ohm.

2.



Pour mesurer U_{PN} , brancher un voltmètre aux bornes P et N : la borne V sur P , la borne COM sur N .

3. $U_{PN} = E - r \cdot I$.

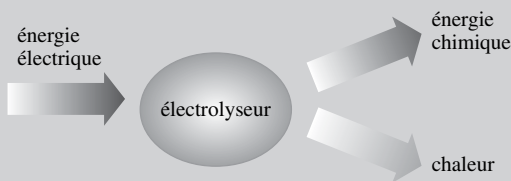
4. 1. Vrai. 2. a. Vrai. b. Vrai. c. Faux. 3. Vrai.

5. 1. Lampe à incandescence, moteur, diode électroluminescente (DEL), résistance, électrolyseur.

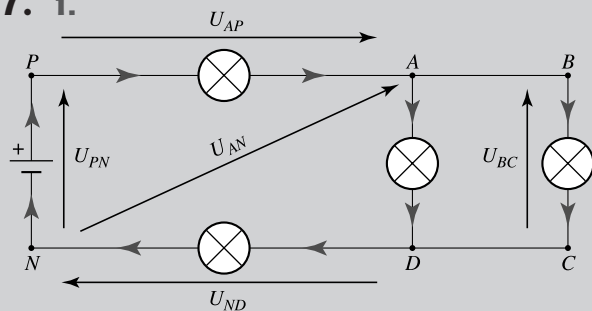
2. Conversion de l'énergie électrique dans :

- une lampe à incandescence : rayonnement et chaleur ;
- un moteur : chaleur et travail mécanique ;
- une diode électroluminescente : rayonnement ;
- une résistance : chaleur ;
- un électrolyseur : énergie chimique et chaleur.

6. Transferts d'énergie dans un électrolyseur :



7. 1.



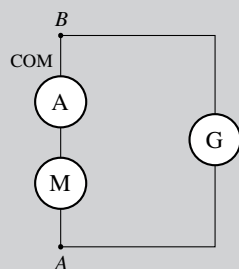
2. Tensions positives : U_{PN} , U_{BC} , U_{AN} . Dans le générateur, la flèche correspondant à la tension de valeur positive est dans le sens du courant ; dans les récepteurs, c'est le contraire.

8. 1. Le voltmètre mesure U_{BA} , car la borne V est reliée à B .

2. La tension positive est U_{AB} . Comme le moteur est un récepteur, le courant circule de A vers B .

3. Le courant doit ressortir par la borne COM de l'ampèremètre.

Voir le schéma ci-contre.

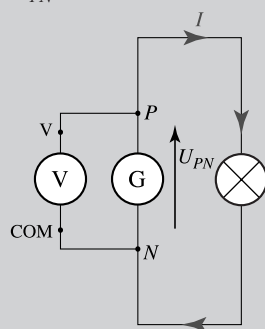


9. 1. Le voltmètre mesure U_{PN} .

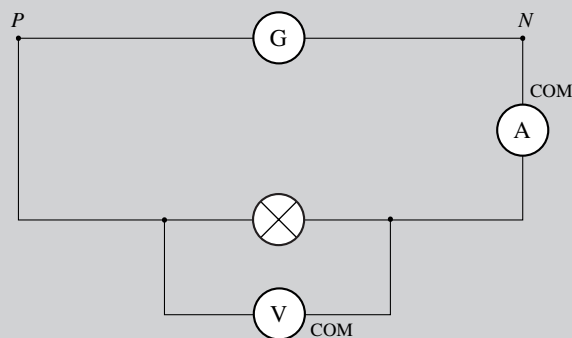
2. U_{PN} étant positif, la borne V du voltmètre est reliée à la borne positive P du générateur.

3. La tension U_{PN} est représentée sur le schéma ci-contre :

4. Le courant circule de P à N dans le circuit extérieur à la pile.



10. 1. Voir le schéma du circuit ci-dessous :



2. Le multimètre de droite mesure l'intensité I du courant qui circule dans la lampe, celui de gauche la tension U aux bornes de la lampe.

3. $I = 0,210 \text{ A}$ et $U = 3,72 \text{ V}$.

4. $\mathcal{P} = U \cdot I = 0,781 \text{ W}$.

11. 1. Puissance nominale : 40 W .

2. $I = \frac{\mathcal{P}}{U} = 0,18 \text{ A}$.

3. $W = \mathcal{P} \cdot \Delta t = 40 \times 2 \times 3600 = 0,29 \text{ MJ}$.

12. 1. $\mathcal{P} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$,

donc : $I_{\text{eff}} = \frac{\mathcal{P}}{U_{\text{eff}}} = \frac{1500}{230} = 6,52 \text{ A}$.

2. $R = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = 35,3 \Omega$.

3. $W = \mathcal{P} \cdot \Delta t = 1500 \times 45 \times 60 = 4,05 \times 10^6 \text{ J}$.
 $W = 1,500 \times 0,75 = 1,13 \text{ kWh}$.

13. 1. $\mathcal{P}_{\text{max}} = R \cdot I_{\text{max}}^2$,

donc : $I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\mathcal{P}_{\text{max}}}{R}} = 0,17 \text{ A}$.

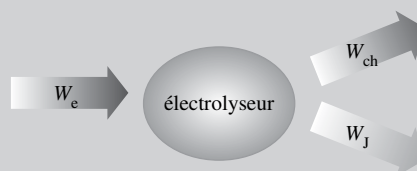
2. $\mathcal{P}_{\text{max}} = \frac{U_{\text{max}}^2}{R}$, donc $U_{\text{max}} = \sqrt{\mathcal{P}_{\text{max}} \cdot R} = 3,0 \text{ V}$.

14. 1. Loi de fonctionnement d'un conducteur ohmique : $U = R \cdot I$.

2. L'énergie reçue par le conducteur ohmique est convertie en chaleur.

3. $W = \mathcal{P} \cdot \Delta t = \left(\frac{U_{\text{eff}}^2}{R} \right) \cdot \Delta t = 230^2 \times 2 \times \frac{60}{120} = 52,9 \text{ kJ}$.

15. 1. Conversions d'énergie dans un électrolyseur :



2. a. $\mathcal{P}_e = U \cdot I = 0,98 \text{ W}$.

b. $\mathcal{P}_{\text{ch}} = E \cdot I = 0,43 \text{ W}$.

c. $\mathcal{P}_J = \mathcal{P}_e - \mathcal{P}_{\text{ch}} = 0,55 \text{ W}$.

3. $W_{\text{ch}} = \mathcal{P}_{\text{ch}} \cdot \Delta t = 1,2 \times 10^3 \text{ J}$.

4. a. $r = \frac{U_{AC} - E}{I} = 9,6 \Omega$.

b. $I = \frac{U_{AC} - E}{r} = 0,44 \text{ A}$.

16. 1. $\mathcal{P}_{\text{Joule}} = r \cdot I^2 = 9,7 \text{ W}$.

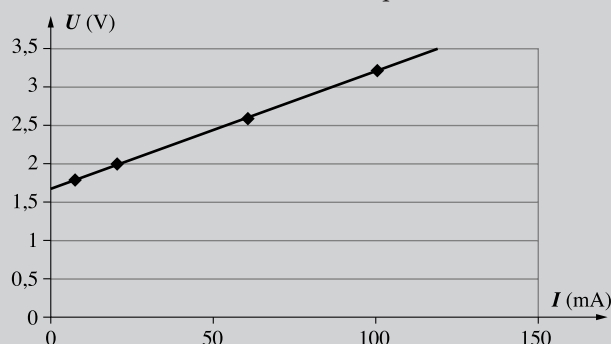
$\mathcal{P}_{\text{circuit}} = U_{PN} \cdot I = 0,22 \text{ kW}$.

2. a. $U_{PN} = E - r \cdot I$, donc $E = U_{PN} + r \cdot I = 13 \text{ V}$.

b. E est la tension à vide ou force électromotrice.

3. $\mathcal{P}_{\text{totale}} = E \cdot I = 0,23 \text{ kW}$

17. 1. Tracé de la caractéristique :



2. a. La caractéristique est une droite croissante qui ne passe pas par l'origine. Son équation est du type :

$$U = r \cdot I + E.$$

b. E est l'ordonnée à l'origine $E = 1,7 \text{ V}$; r est la pente $r = 15 \Omega$.

E représente la force électromotrice de l'électrolyseur; r représente la résistance interne.

3. a. $\mathcal{P}_j = r \cdot I^2 = 15 \times 0,075^2 = 0,084 \text{ W}$.

b. $\mathcal{P}_e = U \cdot I = (1,7 + 15 \times 0,075) \times 0,075 = 0,21 \text{ W}$.

$\mathcal{P}_{\text{ch}} = E \cdot I = 1,7 \times 0,075 = 0,13 \text{ W}$.

4. a. La mesure d'une intensité électrique atteste qu'une électrolyse a lieu, car l'échange d'électrons au niveau des électrodes impose une réaction d'oxydation à une électrode (électrons cédés) et de réduction (électrons gagnés) à l'autre.

b. Si la tension imposée entre les électrodes est inférieure à la force électromotrice, il n'y a pas d'électrolyse; c'est le cas avec la pile de 1,5 V.

18. 1. $\mathcal{P}_e = U \cdot I = E \cdot I - r \cdot I^2 = 3,5 \text{ kW}$.

2. a. $W_m = m \cdot g \cdot h = 12 \text{ kJ}$.

b. $\mathcal{P}_m = \frac{W_m}{\Delta t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{\Delta t} = 3,0 \text{ kW}$.

3. a. $W_j = r \cdot I^2 \cdot \Delta t = 1,4 \text{ kJ}$.

b. $W_m + W_j = 13,4 \text{ kJ} < \mathcal{P}_e \cdot \Delta t = 14 \text{ kJ}$; il y a donc d'autres pertes (pertes magnétiques, frottements...)

19. 1. $\mathcal{P}_e = U \cdot I = E \cdot I - r \cdot I^2$.

2. I vérifie l'équation du second degré suivante :

$$r \cdot I^2 - E \cdot I + \mathcal{P}_e = 0,$$

soit $0,080 \cdot I^2 - 12 \cdot I + 60 = 0$.

Les solutions de cette équation sont :

$$I_1 = 5,2 \text{ A} \text{ et } I_2 = 145 \text{ A}.$$

3. a. $U \cdot I$ est la puissance électrique fournie au circuit; $E \cdot I$ représente la puissance totale produite par le générateur; le rendement η est le rapport de la puissance fournie au circuit par la puissance totale produite par le générateur ($\eta \leq 1$).

b. 1^{er} cas : $I = I_1 = 5,2 \text{ A}$

et $U = E - r \cdot I_1 = 12 - 0,08 \times 5,2 = 11,6 \text{ V}$;

$\eta = 0,97$ et $\mathcal{P}_j = r \cdot I_1^2 = 0,08 \times 5,2^2 = 2,2 \text{ W}$.

2^e cas : $I = I_2 = 145 \text{ A}$

et $U = E - r \cdot I_2 = 12 - 0,08 \times 145 = 0,40 \text{ V}$;

$\eta = 0,03$ et $\mathcal{P}_j = r \cdot I_2^2 = 0,08 \times 145^2 = 1,7 \text{ kW}$.

20. 1. Cette courbe n'est pas une caractéristique intensité-tension, mais elle permet de suivre l'évolution de la tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au cours du temps.

2. Un élément a une f.é.m. de 1,2 V; pour obtenir

$E = 9,6 \text{ V}$, il faut $\frac{9,6}{1,2} = 8$ éléments.

3. a. La capacité d'un générateur est le produit de l'intensité moyenne débitée par la durée de fonctionnement.

Elle caractérise donc la quantité d'électricité débitée : Pile alcaline de type LR06 :

$$Q_1 = 2800 \text{ mAh} = 1,01 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{s}.$$

Élément d'accumulateur NiMH :

$$Q_2 = 1750 \text{ mAh} = 6,30 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{s}.$$

b. $\Delta t = \frac{Q}{I}$;

$\Delta t_1 = 9,33$ heures pour la pile LR06;

$\Delta t_2 = 5,83$ heures pour la pile NiMH.

c. $\Delta U_1 = E_1 - U_1 = E_1 - (E_1 - r_1 \cdot I) = r_1 \cdot I = 0,15 \text{ V}$;

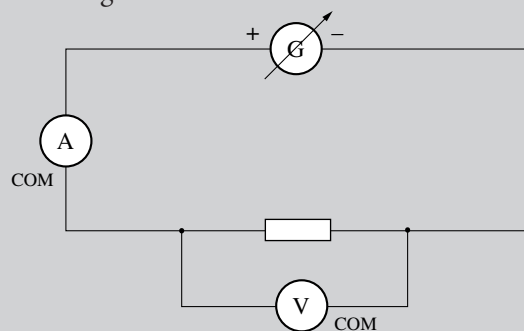
$\Delta U_2 = r_2 \cdot I = 0,015 \text{ V}$.

d. Les accumulateurs présentent moins de pertes par effet Joule alors qu'ils ont des f.é.m à peu près identiques.

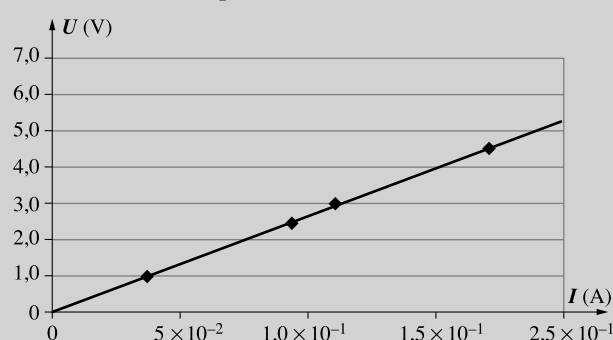
21. 1.

Tension U_{AB} (en V)	1,0	2,5	3,0	4,5	6,0
Intensité du courant I (en A)	$3,7 \times 10^{-2}$	$9,3 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,7 \times 10^{-1}$	?

2. Montage :



3. a. Caractéristique intensité-tension :



La représentation graphique $U = f(I)$ est une droite passant par l'origine, on peut donc dire que la tension U est proportionnelle à l'intensité I .

b. $R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = 27 \, \Omega$.

Valeur manquante : $I = \frac{U}{R} = \frac{6}{27} = 0,22 \, \text{A}$.

4. $\mathcal{P}_{\text{max}} = U_{\text{max}} \cdot I = 6 \times 0,22 = 1,3 \, \text{W}$.

22. 1. a. $U = C \cdot I^\beta$.

$C = 120 \, \text{S.I.}$ et $\beta = 0,20$. La puissance maximale qui peut être dissipée dans le RDT est $\mathcal{P}_{\text{max}} = 4,0 \, \text{W}$.

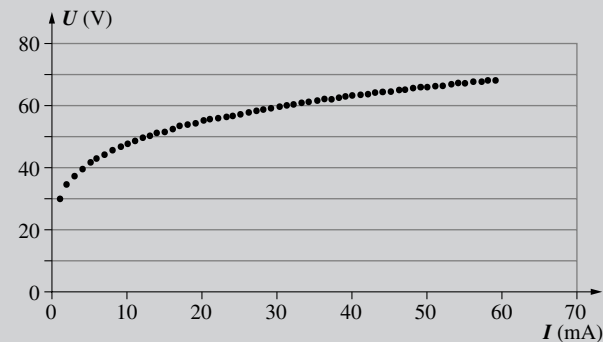
$\mathcal{P}_{\text{max}} = U \cdot I_{\text{max}} = C \cdot I_{\text{max}}^{\beta+1}$.

b. $I_{\text{max}} = \left(\frac{\mathcal{P}_{\text{max}}}{C} \right)^{\frac{1}{\beta+1}} = 0,059 \, \text{A}$, soit $59 \, \text{mA}$.

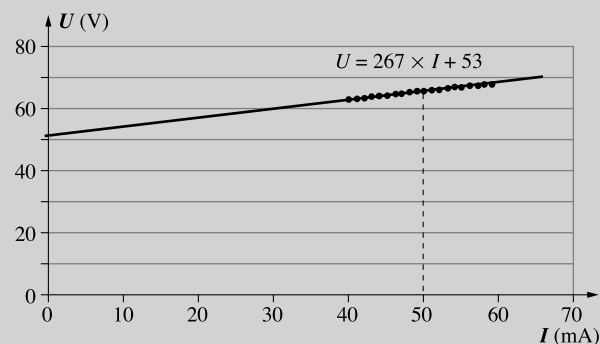
c. $U_{\text{max}} = \frac{\mathcal{P}_{\text{max}}}{I_{\text{max}}} = \frac{4,0}{0,059} = 68 \, \text{V}$. Le RDT fonctionne

pour des intensités inférieures à $59 \, \text{mA}$ et des tensions inférieures à $68 \, \text{V}$.

2. Caractéristique intensité-tension du RDT :



3. Modélisation au voisinage de I_0 : $U = E + r \cdot I$.



$E = 53 \, \text{V}$; $R = 0,26 \, \text{k}\Omega$.

23. 1. a. $\mathcal{P}_{\text{lampe}} \approx \frac{\mathcal{P}_{\text{dispositif}}}{N_{\text{lampes}}} = \frac{120 \times 10^3}{20\,000} = 6 \, \text{W}$.

b. La puissance réellement consommée par une lampe scintillante est inférieure à la puissance calculée : les 40 kilomètres de câble consomment une puissance Joule non négligeable.

2. a. $\mathcal{P}_{\text{tour}} = \mathcal{P}_{\text{scintillement}} + \mathcal{P}_{\text{éclairage}} + \mathcal{P}_{\text{phare}}$
 $= 120 \times 10^3 + 352 \times 10^3 + 4 \times 6 \times 10^3$
 $= 496 \times 10^3 \, \text{W}$
 $= 496 \, \text{kW}$.

b. Il faudrait aussi compter : la puissance Joule dans les câbles, la puissance du refroidissement du phare, celle des moteurs du phare, celle des dispositifs électroniques de commande.

3. $W_{\text{scintillement}} = \mathcal{P}_{\text{scintillement}} \times \Delta t$;

$\Delta t = 5 \times 10 \times 60 \times 365 = 1,095 \times 10^6 \, \text{s}$;

$W_{\text{scintillement}} = 131 \, \text{GJ}$.

4. $W_{\text{phare}} = 104 \, \text{GJ}$.

24. 1. L'énergie électrique que peut fournir la pile s'exprime par la relation $W = U \cdot I \cdot \Delta t$. La tension nominale aux bornes de la pile est donnée de même que le produit $I \cdot \Delta t$ qui représente la capacité nominale de la pile. On peut donc déterminer l'énergie électrique que peut fournir la pile en multipliant la tension nominale par la capacité nominale de la pile.

2. Pour la pile D : $W = 1,5 \times 15 \times 3\,600 = 81 \, \text{kJ}$.

Les piles C, AA et AAA ont des capacités nominales plus faibles pour la même tension nominale, l'énergie disponible est donc plus faible.

Pour la pile 9 V : $W = 9 \times 0,58 \times 3\,600$
 $= 19 \, \text{kJ} < 81 \, \text{kJ}$.

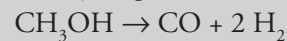
3. $I = 0,5 \, \text{A}$ comme $C = I \cdot \Delta t = 0,58 \, \text{A.h}$,

$\Delta t = \frac{C}{I} = \frac{0,58}{0,5} = 1,16 \, \text{h}$, soit environ 1 h 10 min.

4. À tension constante, la capacité nominale est proportionnelle à l'énergie électrique produite, sa valeur en A.h permet de déterminer la durée de fonctionnement moyenne (en heure) si l'intensité est constante.

25. 1. a. On peut obtenir du dihydrogène à partir du méthanol, le méthanol permet donc de « stocker l'hydrogène ».

b. Le reformeur décompose le méthanol en monoxyde de carbone et en dihydrogène selon :



c. Dans le reformeur, l'air apporte le dioxygène pour oxyder CO en CO_2 .

d. Le monoxyde de carbone CO est toxique, il provoque l'asphyxie par inhalation. On l'élimine en l'oxydant en CO_2 .

2. a. Équation de la réaction ayant lieu quand la pile débite : $2 \, \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \, \text{H}_2\text{O}$

b. $\text{H}_2 = 2 \, \text{H}^+ + 2 \, \text{e}^-$; l'électrode où se produit cette réaction est la borne -, car les électrons en sortent pour aller dans le circuit extérieur à la pile.

3. $E = 1,2 \, \text{V}$ est la tension aux bornes de la pile lorsqu'elle ne débite aucun courant. C'est la tension maximale que l'on pourra obtenir aux bornes de cette pile utilisée en générateur.

26. 1. Entre l'entrée EA0 et la masse M, l'interface mesure la tension aux bornes du générateur.

Entre EA1 et M, l'interface mesure la tension aux bornes du conducteur ohmique de résistance $R = 10 \, \Omega$.

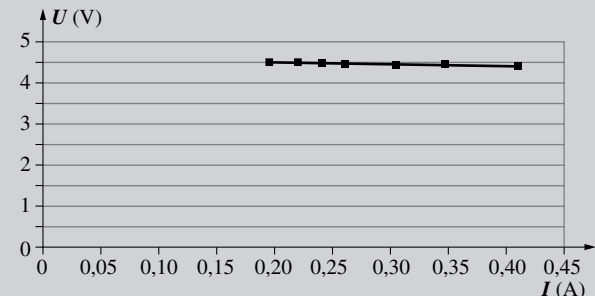
2. Le rhéostat permet de modifier la résistance du circuit, donc l'intensité du courant qui y circule.

3. L'intensité du courant qui circule dans le circuit s'exprime en fonction de la tension U aux bornes de la résistance R par la relation : $I = \frac{U}{R}$.

4. Courbe intensité-tension :

$U_{(EA0; M)}$	4,49	4,48	4,47	4,45	4,43	4,41	4,37
$U_{(EA1; M)}$	1,95	2,19	2,40	2,62	3,05	3,46	4,10
$I = \frac{U_{(EA1; M)}}{R}$	0,195	0,219	0,240	0,262	0,305	0,346	0,410

5. Loi de fonctionnement de la pile : $U = E - r \cdot I$ avec $E = 4,6 \text{ V}$ et $r = 0,56 \Omega$.



27. 1. a. Voie 1 : point B ; masse : point C ; voie 2 : point A.

b. Entre la voie 1 et la masse : U_{BC} et entre la voie 2 et la masse : U_{AC} .

c. Pour avoir l'intensité I du courant qui traverse la diode, on applique la loi d'Ohm aux bornes de la résistance : $U_{BC} = -R \cdot I$.

d. La tension aux bornes du conducteur ohmique donne un signal proportionnel au courant.

e. Non, ce ne sera pas l'allure attendue, car il faut avoir l'intensité du courant I en abscisse, or on a :

$U_{BC} = -R \cdot I$; il faut donc diviser par $-R$ la tension mesurée.

2. a. Il doit être branché en mode $x-y$.

b. En x , on entre B ; en y , on entre A (C est à la masse).

c. Il faut faire INV sur x .

d. En fait, la courbe représente $U = f(R \cdot I)$ et pas $U = f(I)$. L'allure est malgré tout la même, il y a juste un problème d'homothétie sur l'axe des abscisses.

28. A. Analyse du document

1. Le courant I_{cc} de court-circuit est le courant débité par le module lorsque la tension à ses bornes est nulle.

2. La tension U_{cc} en circuit ouvert est représentée par les points noirs (tension quand $I = 0 \text{ A}$). Ces points sont très voisins U_{cc} est comprise entre 20 V et 22 V.

3. L'unité de l'éclairement est $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (puissance lumineuse reçue par unité de surface éclairée).

B. Exploitation

1. Oui, il existe une relation de proportionnalité entre I_{cc} et l'éclairement : lorsque l'éclairement double, I_{cc} double.

$\left(\frac{\text{éclairement}}{I_{cc}}\right) = \text{constante} = 200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$.

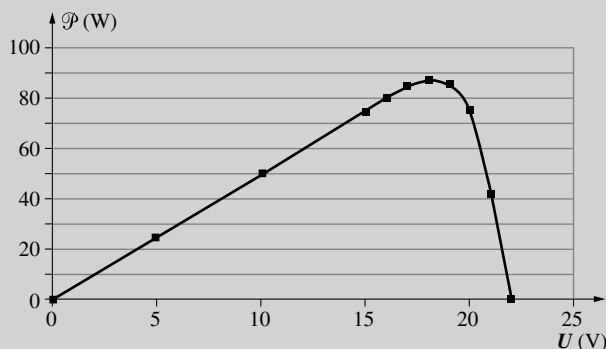
2. $\mathcal{P} = U \cdot I$. La tension U délivrée par le module est 12 V. Pour les différents éclairements, on lit l'intensité I sur les courbes et on obtient les puissances électriques délivrées : 12 W ; 24 W ; 36 W ; 48 W et 60 W.

3. a. Lorsque $U < 15 \text{ V}$, le courant débité est constant quelle que soit la tension délivrée, d'où le nom de générateur de courant.

b. La résistance interne correspond au rapport $\frac{\Delta U}{\Delta I}$.

Ici, I étant quasiment constant, donc ΔI est proche de zéro quel que soit ΔU . La résistance interne est donc très élevée.

4. a. Représentation de $\mathcal{P} = U \cdot I$ en fonction de U pour un éclairement de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.



Droite croissante passant par l'origine jusqu'à 18 V environ, puis décroissance brutale.

b. La puissance maximale est d'environ 85 W, ce qui correspond à la valeur indiquée par le constructeur.

c. On a intérêt à utiliser le module photovoltaïque dans le « coude » de la caractéristique, la puissance délivrée est alors maximale.

Exercices complémentaires

Énoncés

1. Caractéristique d'un conducteur ohmique

Lors d'une séance de travaux pratiques au cours de laquelle on doit tracer la caractéristique d'un conducteur ohmique, un groupe d'élèves obtient le tableau de mesures suivant :

$U(\text{V})$	0	0,3	1,6	3,5	5
$I(\text{mA})$	0	1,4	7,1	16	23

1. Indiquer le montage ayant permis de réaliser ces mesures.

2. a. Tracer la caractéristique $U = f(I)$.

b. En déduire la valeur de la résistance de ce conducteur ohmique.

3. La puissance maximale admissible par ce conducteur ohmique est 0,25 W. Quelles tension et intensité maximales ne doit-on pas dépasser afin de ne pas détruire le composant ?

2. Rendement d'un moteur

Un moteur muni d'une poulie sur laquelle peut s'enrouler un fil au bout duquel est fixée une charge pesante de 100 g est alimenté par un générateur.

Un ordinateur muni d'un dispositif adapté peut enregistrer l'évolution de la tension et de l'intensité qui circule dans le moteur en fonctionnement.

Le moteur soulève la charge d'une hauteur $h = 1,32$ m en une durée $\tau = 3,55$ s. Pendant cette durée, l'intensité qui a traversé le moteur vaut $I = 150$ mA et la tension d'alimentation du moteur $U = 4,5$ V.

1. Lors du fonctionnement du moteur, indiquer en quelle énergie utile est convertie l'énergie électrique.
2. Quelle est la valeur W_g de l'énergie fournie par le générateur au moteur lors de l'expérience?
3. Quelle est la valeur W_m de l'énergie utilisée par le moteur pour élever la charge?
4. On appelle rendement du moteur le rapport de l'énergie utile sur l'énergie totale reçue par le moteur. Calculer le rendement du moteur.
5. Sous quelle forme est « perdue » l'énergie restante?
Donnée : $g = 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3. Régulateur de tension 7805

Le régulateur intégré de tension RIT 7805 est un composant qui, une fois alimenté, délivre une tension de sortie U_s continue et constante, de valeur $U_s = 5$ V. On souhaite vérifier la conservation de l'énergie lors de l'utilisation d'un régulateur de tension.

Pour cela, on réalise les expériences A et B suivantes :

On verse dans un bécher du pétrole lampant; ce bécher sera, dans la suite de l'expérience, enfermé dans du polystyrène afin d'éviter les échanges de chaleur avec le milieu extérieur.

A. On place dans le bécher une résistance chauffante de 60Ω que l'on alimente à l'aide d'un générateur de tension stabilisée de 12 V. Un thermomètre permet de suivre l'évolution de la température du pétrole. On remarque que, lorsque la résistance est alimentée, la température augmente de $1,7^\circ\text{C}$ par minute.

1. Quelle est l'énergie apportée au milieu extérieur par la résistance pendant une minute de cette expérience.

2. Comment se nomme cet effet?

B. On remplace la résistance par le RIT alimenté par le même générateur $U_e = 12$ V. L'intensité d'entrée est alors de $I_e = 510$ mA. Le RIT en fonctionnement débite dans une résistance de 10 ohms . L'intensité du courant de sortie mesuré est $I_s = 500$ mA. L'augmentation de température du pétrole chauffé par le RIT est alors de $2,4^\circ\text{C}$ par minute.

1. Quelle est l'énergie fournie par le générateur au RIT en une minute?

2. Quelle est l'énergie fournie par le RIT à la résistance en une minute?

3. En supposant que l'augmentation de température du milieu extérieur est proportionnelle à la quantité de chaleur reçue, quelle est la quantité de chaleur perdue par le RIT en une minute? Conclure.

4. La préparation de l'aluminium

L'élaboration de l'aluminium est la deuxième industrie électrochimique mondiale (après la préparation électrochimique du dichlore et de la soude). Cette industrie produit annuellement 20 millions de tonnes de métal dont la pureté atteint 99,5 %.

« Le principe de production n'a pas changé depuis les brevets de Paul HÉROULT et Charles-Martin HALL, en 1886.

Paul HÉROULT construisit une de ses premières cuves industrielles dans une usine métallurgique actionnée par une chute du Rhin à Neuhausen (Suisse), alors que C.-M. HALL en installa une au pied des chutes du Niagara (États-Unis). Dans les unités de production modernes, un bain est constitué en moyenne par 5 % d'alumine, 83 % de cryolithe, 7 % de fluorure d'aluminium et 5 % de fluorure de calcium. La température du mélange à l'état liquide est comprise entre 960 et $1\,000^\circ\text{C}$; l'intensité du courant atteint $100\,000$ A et la tension entre l'anode et la cathode est de $4,1$ V. Une usine comporte une centaine de cuves d'électrolyse placées en série.

L'anode est en carbone (coke calciné) et la cathode est l'aluminium formé à l'état liquide qui se dépose au fond de la cuve.

La théorie de l'électrolyse est complexe du fait de la multitude des réactions secondaires. Néanmoins, il est certain que ce sont les ions Al^{3+} qui réagissent sur la cathode pour donner de l'aluminium; les électrons sont apportés par le courant électrique qui part de la cathode. La tension d'électrolyse à intensité nulle est de $1,8$ V. »

Données supplémentaires :

masse molaire de l'aluminium : $27 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;

densité du solide à 20°C : 2,70;

densité du liquide à 660°C : 2,38;

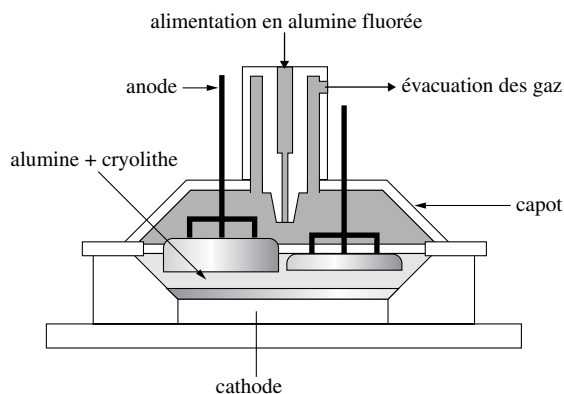
température de fusion : 660°C ;

température de fusion de l'alumine : $2\,040^\circ\text{C}$;

température de fusion de la fluorine : $1\,360^\circ\text{C}$;

charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

constante d'AVOGADRO : $A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.



Cuve à électrolyse pour la préparation de l'aluminium.

A. Compréhension du texte

1. Pourquoi les inventeurs du procédé de production industrielle de l'aluminium installèrent-ils leurs usines à proximité de chutes d'eau?

2. a. En quelle matière est constituée l'anode? la cathode?

b. Comparer la densité du bain et celle de l'aluminium formé.

c. Quelle propriété doit posséder le matériau constituant la cuve d'électrolyse?

B. Exploitation scientifique

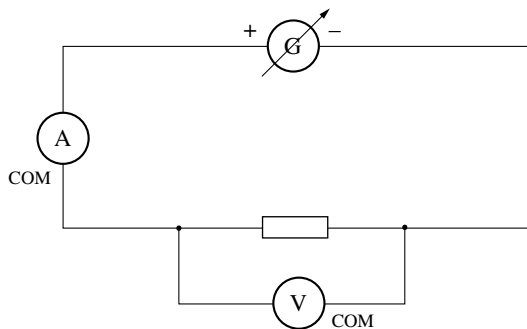
1. Écrire l'expression littérale de la tension entre anode et cathode.

2. a. Quelle est la valeur de la tension entre ces électrodes?

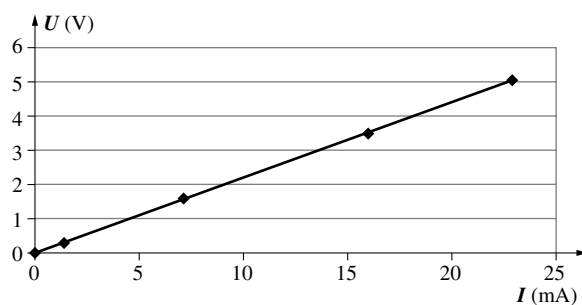
- b.** Quelle est la valeur de la force électromotrice d'une cuve d'électrolyse ?
- c.** Évaluer la résistance interne r pour l'intensité donnée $I = 100 \text{ kA}$.
- 3. a.** Calculer la puissance chimique d'une cuve.
- b.** Quelle est la puissance dissipée par effet Joule ?
- c.** Cette puissance doit-elle être considérée comme perdue ? Justifier votre réponse.
- 4. a.** Écrire la demi-réaction électronique au niveau de la cathode.
- b.** En déduire la quantité d'électricité Q nécessaire à la formation d'une mole d'aluminium, puis d'une tonne d'aluminium.
- 5.** Cette quantité d'électricité Q , apportée par un courant d'intensité I pendant une durée Δt , est telle que $Q = I \cdot \Delta t$.
- a.** Calculer la durée nécessaire pour fabriquer une tonne d'aluminium.
- b.** Quelle quantité d'énergie électrique doit être fournie pour produire 1 t d'aluminium avec $U = 4,4 \text{ V}$? Exprimer le résultat en kWh ($1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$).

Corrigés

- 1. 1.** Montage :



- 2. a.** Caractéristique :



- b.** Pente de la caractéristique : $R = 220 \Omega$.

3. $I_{\max} = \sqrt{\frac{\mathcal{P}_{\max}}{R}} = 34 \text{ mA}$, soit $U_{\max} = R \cdot I_{\max} = 7,4 \text{ V}$.

- 2. 1.** L'énergie électrique est convertie en énergie mécanique.

2. $W_g = U \cdot I \cdot \tau = 2,4 \text{ J}$.

3. $W_m = m \cdot g \cdot h = 1,3 \text{ J}$.

4. $r = E_m / E_g = 54 \%$.

- 5.** L'énergie « perdue » a été convertie en chaleur du fait des frottements.

3. A. 1. $W_1 = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t = 0,14 \text{ kJ}$.

- 2.** C'est l'effet Joule.

B. 1. $W_c = U_c \cdot I_c \cdot \Delta t = 0,37 \text{ kJ}$.

2. $W_s = R \cdot I^2 \cdot \Delta t = 0,15 \text{ kJ}$.

- 3.** L'énergie consommée par le RIT est :

$$W = W_c - W_s = 0,22 \text{ kJ};$$

$$W_1 = Q_1 = k \cdot \Delta\theta_1 \text{ donc } k = 85 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1};$$

$Q_2 = k \cdot \Delta\theta_2 = 0,20 \text{ kJ}$. L'énergie consommée par le RIT a servi à chauffer le pétrole. On peut conclure à la conservation de l'énergie.

- 4. A. 1.** Pour utiliser l'énergie des chutes d'eau (transformation en énergie électrique).

- 2. a.** L'anode est en carbone; la cathode est en aluminium.

- b.** L'aluminium formé est plus dense que le bain, car il se dépose au fond.

- c.** Le matériau est réfractaire, résistant à des températures élevées.

II. 1. $U_{AC} = E + r \cdot I$.

2. a. $U_{AC} = 4,1 \text{ V}$.

b. $E = 1,8 \text{ V}$.

c. $r = \frac{U_{AC} - E}{I}$; $r = 2,3 \times 10^{-5} \Omega$.

3. a. $\mathcal{P} = E \cdot I = 1,8 \times 10^5 \text{ W}$.

b. $\mathcal{P} = r \cdot I^2 = 2,3 \times 10^{-5} \times 10^{10} = 2,3 \times 10^5 \text{ W}$.

- c.** La puissance Joule permet de maintenir la température élevée du mélange : elle n'est pas perdue.

4. a. $\text{Al}^{3+} + 3 e^- = \text{Al}$.

- b.** Quantité d'électricité Q nécessaire à la formation d'une mole d'aluminium :

$$Q = 3 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 6,02 \times 10^{23} = 2,9 \times 10^5 \text{ C}.$$

Quantité d'électricité Q' nécessaire à la formation d'une tonne d'aluminium :

$$Q' = 2,9 \times 10^5 \times \frac{10^6}{27} = 1,1 \times 10^{10} \text{ C}.$$

5. a. $t = \frac{Q}{I} = 1,1 \times 10^5 \text{ s} \approx 31 \text{ h}$.

b. $W_c = U_{AC} \cdot I \cdot t = 1,3 \times 10^7 \text{ Wh} = 1,3 \times 10^4 \text{ kWh}$.

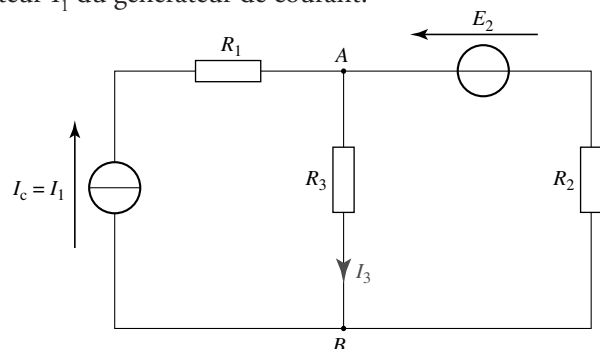
Compléments scientifiques

Voici un exercice simple pouvant être traité par :

1. les lois de Kirchoff;
2. le théorème de superposition;
3. le théorème de Thévenin.

Énoncé

Calculer I_3 en fonction des données : R_1, R_2, R_3 , la f.é.m. E_2 du générateur de tension et du courant électromoteur I_1 du générateur de courant.

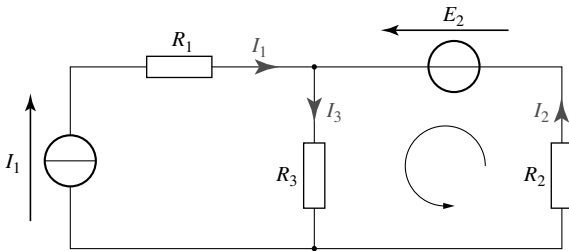


1. LOIS DE KIRCHOFF

$$\begin{cases} E_2 = R_3 I_3 + R_2 I_2 \\ I_3 = I_1 + I_2 \end{cases}$$

On en déduit, après élimination de I_2 :

$$I_3 = \frac{E_2 + R_2 I_1}{R_3 + R_2}$$



2. Théorème de superposition

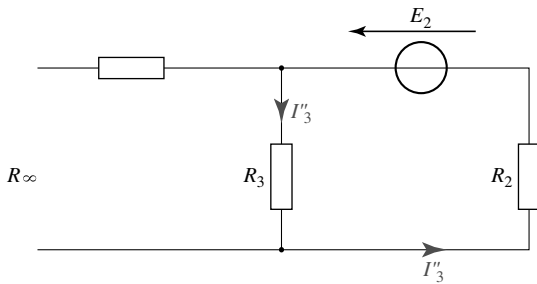
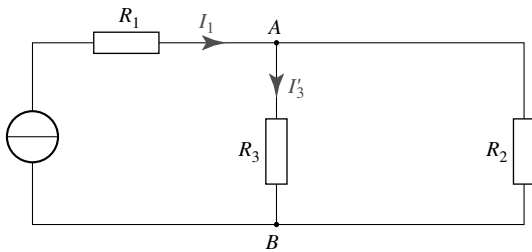
- Diviseur de courant :

$$I'_3 = I_1 \cdot \frac{g_3}{g_3 + g_2} = I_1 \cdot \frac{1/R_3}{1/R_3 + 1/R_2}$$

$$I'_3 = I_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

$$I''_3 = \frac{E_2}{R_2 + R_3}$$

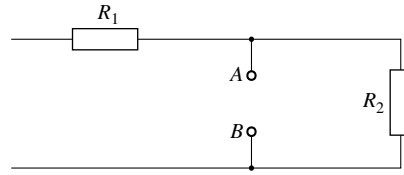
$$I_3 = I'_3 + I''_3 = \frac{E_2 + R_2 I_1}{R_3 + R_2}$$



3. Théorème de THÉVENIN

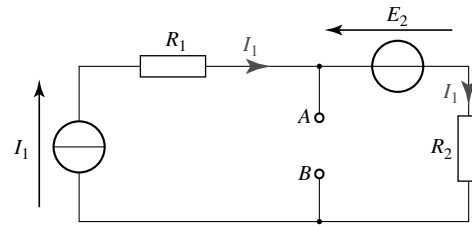
On cherche le générateur de tension équivalent entre les nœuds A et B , la résistance R_3 ayant été supprimée.

- Sa résistance interne est la résistance équivalente entre A et B dans le circuit ci-dessous.



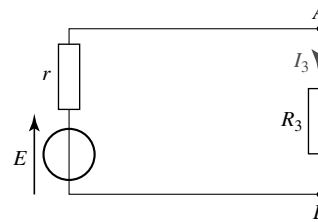
On trouve $r = R_2$.

- Sa f.é.m. E est la tension entre A et B dans le circuit ci-dessous.



$$E = U_{AB} = E_2 + R_2 I_1$$

- Circuit équivalent :



L'intensité du courant dans R_3 est égale à :

$$I_3 = \frac{E}{r + R_3}, \text{ soit } I_3 = \frac{E_2 + R_2 I_1}{R_2 + R_3}$$

Comportement global d'un circuit électrique

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

III. Électrodynamique

A. Circuit électrique en courant continu

2. Comportement global d'un circuit

Objectifs

Dans une première partie, on montre comment se transforme l'énergie dans un circuit électrique en soulignant l'importance de l'effet Joule, autant dans ses applications que dans ses inconvénients. À cette occasion, l'élève va réinvestir les connaissances sur l'introduction à l'énergie. L'approche énergétique est privilégiée, mais c'est aussi l'occasion de s'approprier certaines lois de l'électrocinétique.

Contenus

2. Comportement global d'un circuit

2.1 Distribution de l'énergie électrique :

- Pendant la durée Δt :

$$W_e(\text{générateur}) = \Sigma W_e(\text{récepteur}).$$

- Justification énergétique des lois d'additivité des tensions et des intensités (loi des nœuds).

2.2 Étude des paramètres influant sur l'énergie transférée par le générateur au reste d'un circuit résistif :

- l'influence de la force électromotrice E ;
- l'influence des résistances et de leurs associations ;
- la relation $I = \frac{E}{R_{eq}}$;
- la puissance maximale disponible aux bornes d'un générateur, tolérée par un récepteur.

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Utiliser l'additivité des résistances en série et des conductances en parallèle.
- Faire des prévisions quantitatives lors de la modification du circuit à partir de la relation $I = \frac{E}{R_{eq}}$.

Exemples d'activités

- Analyser l'influence de l'agencement des composants sur l'énergie transférée par le générateur au reste du circuit.
- Justification de l'utilisation de hautes tensions pour le transport de l'énergie électrique.

Commentaires

On n'étudie que des circuits comportant un seul générateur de tension ; néanmoins le professeur peut mentionner le fait que les générateurs de tension continue sont souvent associés en série de manière à additionner les f.é.m. Les générateurs qui fournissent une tension (et un courant) continu à partir du « secteur » (souvent appelées : alimentations continues) possèdent en général un circuit électronique interne qui, si on respecte la limitation d'intensité indiquée, stabilise la tension aux bornes de sortie ; dans ce cas l'alimentation est équivalente à un générateur de résistance interne négligeable et dont la f.é.m. E est égale à la tension aux bornes de sortie.

L'étude des paramètres influant sur l'énergie transférée par le générateur au reste du circuit permet d'insister sur le rôle de la résistance équivalente du circuit. On montre que finalement l'intensité du courant dépend de cette résistance et que, pour un circuit entièrement résistif, cette intensité est égale à $\frac{E}{R_{eq}}$. On exploitera

cette relation que dans des situations où E est une constante du générateur. Les associations de conducteurs sont mises en œuvre dans le but de constater leur effet sur l'intensité du courant, donc sur l'énergie délivrée par le générateur de tension. Il est important en revanche que l'élève retienne que les associations en série ont pour effet d'augmenter la résistance totale et que les associations en parallèle, en augmentant la conductance totale, aboutissent à une résistance plus faible que la plus petite d'entre elles.

On peut souligner que les installations domestiques utilisent des associations en parallèles aux bornes de l'installation.

Matériel

Cours

> Activité 1

- Deux lampes de puissances nominales différentes.

- Un générateur.
- Deux multimètres.

➤ Activité 2

- Deux conducteurs ohmiques de résistances différentes.
- Un générateur.
- Deux multimètres.

Rechercher et expérimenter

- Deux conducteurs ohmiques de résistances différentes.
- Trois conducteurs ohmiques de résistances identiques comprises entre quelques dizaines et quelques centaines d'ohms.
- Un générateur.
- Un potentiomètre.
- Un multimètre ou une interface d'acquisition de données.
- Trois DEL et trois résistances de protection $R_p = 0,5 \text{ k}\Omega$.

Déroulement du chapitre

Dans un premier temps, on vérifie la conservation de l'énergie (ou de la puissance) dans un circuit électrique simple, puis on retrouve les lois des circuits étudiées au collège. Ensuite, sont étudiés les paramètres influant sur l'énergie fournie par un générateur au reste d'un circuit purement résistif : agencement des dipôles, force électromotrice.

➤ Objectifs

- Savoir que dans un circuit où il n'y a qu'un générateur, le potentiel électrique est une grandeur qui décroît de la borne positive vers la borne négative.
- Utiliser l'additivité des résistances en série et des conductances en dérivation.
- Faire des prévisions quantitatives lors de la réalisation ou de la modification d'un circuit à partir de la relation

$$I = \frac{E}{R_{eq}}$$

➤ Prérequis

- Connaître les lois des circuits électriques : loi d'additivité des tensions, loi d'additivité des intensités.
- Connaître la loi d'Ohm.
- Connaître l'expression de la puissance électrique en courant continu.

Activités préparatoires

A. Au feu !

Dans cette activité, on réactive les notions étudiées au précédent chapitre sur les transformations d'énergie par des dipôles électriques.

Réponses aux questions

- a. Le moteur thermique convertit l'énergie chimique en énergies mécanique et thermique.
- b. L'alternateur convertit une partie de l'énergie mécanique reçue en énergie électrique et dissipe l'autre partie dans l'environnement sous forme thermique.
- c. La pompe électrique convertit une partie de l'énergie

électrique reçue en énergie mécanique et dissipe l'autre partie dans l'environnement sous forme thermique.

2. Comme tout générateur, le groupe électrogène a une puissance limitée et on ne peut brancher à sa sortie qu'un nombre limité d'appareils électriques.

B. Joyeux Noël !

L'objectif de cette activité est de réactiver les concepts de circuits en série et avec dérivation étudiés au collège ainsi que les lois des circuits.

Réponses aux questions

1. L'association des lampes n'est pas la même dans les deux types de guirlandes : elles sont associées soit en série soit en dérivation.
2. Le nombre de lampes est limité par la puissance du générateur qui les alimente.

Cours

1. Comment la puissance est-elle transférée dans un circuit ?

➤ Activité 1

Le principe de conservation de l'énergie étant admis, on se propose de le vérifier à partir de la détermination des puissances cédées par le générateur et reçues par deux lampes associées en série, puis en dérivation.

Réponses aux questions

1. $\mathcal{P}_g = \mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2$.
2. Le principe de conservation de l'énergie est vérifié.

2. Dans un circuit, quelles lois découlent du principe de conservation de l'énergie ?

Le principe de conservation de l'énergie ayant été admis dans un circuit électrique, on montre que l'on peut retrouver les lois des tensions et des intensités qui ont été étudiées au collège. La notion de potentiel électrique est ensuite introduite et l'évolution du potentiel le long d'un circuit série est présentée comme étant compatible avec la loi d'additivité des tensions.

3. De quoi dépend l'énergie fournie par un générateur ?

Après une activité introductive permettant de montrer que l'agencement des dipôles influe sur les transferts d'énergie du générateur vers les récepteurs qui y sont branchés, on étudie les associations de conducteurs ohmiques afin d'exprimer la valeur de la résistance équivalente d'une association. Ce paragraphe montre enfin l'influence de la force électromotrice sur l'intensité du courant débité par le générateur afin d'aboutir à la relation $I = \frac{E}{R_{eq}}$ pour un circuit ne comportant que des dipôles résistifs.

➤ Activité 2

L'activité a pour but de comparer les transferts d'énergie du générateur vers des récepteurs associés tantôt en série tantôt en dérivation. On montre ainsi qu'un géné-

rateur débite un courant plus intense lorsque les mêmes dipôles sont branchés en dérivation.

Réponses aux questions

1. La puissance fournie par le générateur n'est pas la même.
2. L'intensité du courant est plus importante dans le cas d'une association des conducteurs en dérivation.

4. Quelle est la puissance maximale tolérée par un conducteur ohmique ?

Ce paragraphe permet d'aborder les problèmes de puissance maximale tolérée par les conducteurs ohmiques et souvent méconnus des élèves. Ainsi, on montre comment déterminer l'intensité maximale du courant traversant un conducteur ohmique et la tension maximale entre ses bornes, connaissant les valeurs de la puissance nominale et de la résistance.

Rechercher et expérimenter

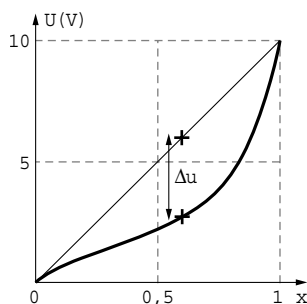
1. Un potentiomètre : comment ça marche ?

Le potentiomètre est d'une utilisation courante dans les montages d'électricité dès qu'il s'agit de faire varier la tension ou l'intensité du courant.

Dans la première partie, on construit la notion de diviseur de tension à partir de deux, puis trois conducteurs ohmiques associés en série. L'étude du potentiomètre est ensuite effectuée « à vide », puis « en charge ». Les mesures de tensions en fonction de la position du curseur pourront être réalisées à l'aide d'une interface d'acquisition de données et d'un tableur, la superposition des courbes obtenues facilitant la comparaison.

On pourra faire prévoir les résultats à l'aide d'une modélisation du comportement du potentiomètre « à vide » et « en charge » proposée sur le site suivant :

<http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/>



Choisir les pages : site exercice physique – Applets JAVA – Potentiomètre alimentant une charge résistive.

Réponses aux questions

1. $R = R_1 + R_2$.
2. D'après la loi d'Ohm : $U_1 = R_1 \cdot I$.
Avec $I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{U}{R}$, soit $U_1 = \frac{U \cdot R_1}{R}$.
3. La valeur U_1 de la tension aux bornes de R_1 est une fraction de la valeur U de la tension aux bornes du générateur, d'où l'expression « diviseur de tension ».
4. $U_1 = \frac{U}{3}$; $U_2 = \frac{2U}{3}$ et $U_3 = U$.
5. La courbe U_x en fonction de x est une droite passant par l'origine.
6. La courbe U_x en fonction de x est une droite passant

par l'origine tandis que la courbe U_x' en fonction de x est une courbe.

7. Seule U_x est une fonction linéaire de la position x du curseur.

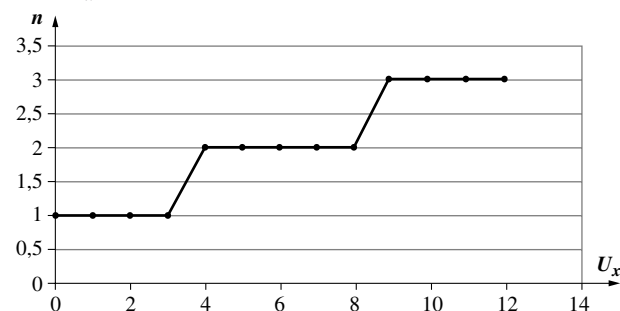
8. Avec le modèle proposé, l'évolution du « volume » sonore n'est pas proportionnelle au déplacement du curseur. En réalité, le dispositif implanté sur une table de mixage est plus complexe.

2. Le bargraphe : comment ça marche ?

Le montage proposé permet de simuler le comportement d'un bargraphe de table de mixage en reprenant le principe du diviseur de tension étudié précédemment. Les résistances R_i peuvent avoir des valeurs comprises entre quelques dizaines et quelques centaines d'ohm, la tension aux bornes du générateur étant fixée à 12 V. Utiliser des résistances de protection R_p de valeur 0,5 kΩ environ pour chaque DEL; des valeurs trop importantes ne permettront pas le passage d'un courant suffisamment intense pour que celles-ci s'allument.

Réponses aux questions

1. Lorsque la tension U_x augmente à partir de la valeur zéro, la diode D_3 est soumise à la valeur de la tension la plus grande, c'est pourquoi elle s'allume avant les deux autres.
2. Nombre n de DEL allumées en fonction de la tension U_x : voir la courbe ci-dessous.



3. L'évolution du nombre de DEL allumées n'est pas proportionnelle à la tension de sortie U_x , donc ce modèle de bargraphe ne reflète pas parfaitement l'augmentation du « volume » sonore.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. Le courant électrique est orienté de A vers F, de E vers B et de D vers C.
2. $U_{DC} = U_{EF} = 5,2 \text{ V}$; $U_{FE} + U_{FB} = U_{AB}$, donc $U_{FE} = 6,8 \text{ V}$.
3. $V_A = V_F = 12 \text{ V}$; $V_B = V_C = 0 \text{ V}$; $V_D = V_E = 5,2 \text{ V}$.
4. Le potentiel décroît : A est en effet la borne positive du générateur.
5. A et F; B et C; D et E, car ils sont reliés par des fils.
2. 1. a. $R_{eq} = n \cdot R$.
b. $R_{eq} = \frac{R}{n}$.
2. Par exemple, R en série avec une association en parallèle de deux résistances.

3. 1. a. $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3}$.

b. $R_{eq} = R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

2. a. $R_{eq} = 22 \Omega$.

b. $R_{eq} = 55 \Omega$.

3. a. $G_{eq} = 0,045 \text{ S}$.

b. $G_{eq} = 0,018 \text{ S}$.

4. 1. Curseur en A : $R_{eq} = r + \frac{R \cdot R'}{R + R'}$;

curseur en B : $R_{eq} = r$.

2. Curseur en A : $R_{eq} = 48 \Omega$;

curseur en B : $R_{eq} = 15 \Omega$.

3. Curseur en A : $I = 0,25 \text{ A}$;

curseur en B : $I = 0,80 \text{ A}$.

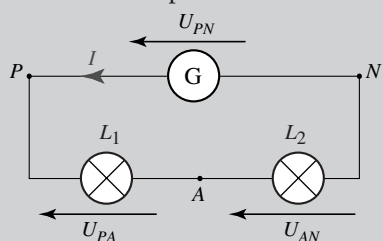
4. Curseur en A : $\mathcal{P} = 3,0 \text{ W}$;

curseur en B : $\mathcal{P} = 9,6 \text{ W}$.

Exercices

1. a. La tension aux bornes d'une association en série de dipôles est égale à la somme des tensions aux bornes de chacun des dipôles.

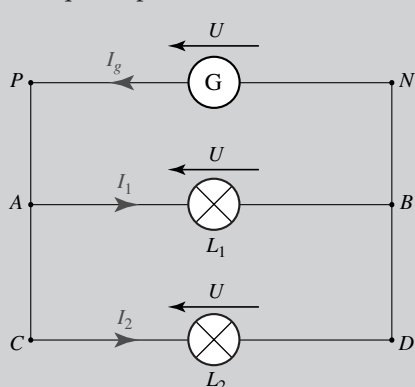
b.



Dans ce circuit, $U_{PN} = U_{PA} + U_{AN}$.

2. a. La somme des intensités des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui en partent.

b.

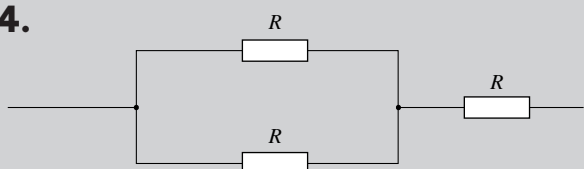


Au nœud A : $I = I_1 + I_2$.

3. a. $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$.

b. $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$.

4.



$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3}{2} \cdot R.$$

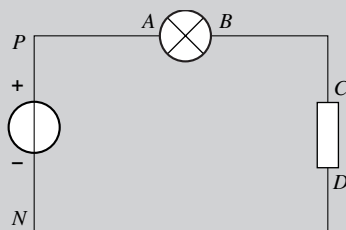
5. a. Vrai, car R_{eq} est égale à la somme des résistances des conducteurs constituant l'association.

b. Vrai.

c. Faux : quel que soit l'agencement des dipôles, pourvu qu'ils restent associés en série, la puissance fournie par le générateur reste la même.

d. Vrai.

6. 1.



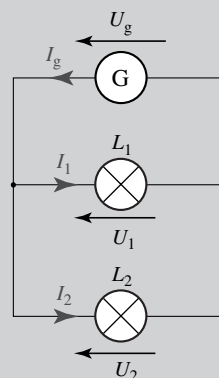
2. D'après la conservation de la puissance :

$$\mathcal{P}_g = \mathcal{P}_{lampe} + \mathcal{P}_{conducteur} = 0,60 + 0,30 = 0,90 \text{ W}.$$

3. $I = 100 \text{ mA}$, car l'intensité du courant est la même en tout point d'un circuit série.

$$4. U = \frac{\mathcal{P}_g}{I} = \frac{0,90}{0,100} = 9,0 \text{ V}.$$

7. 1.



2. D'après la conservation de la puissance :

$$\mathcal{P}_g = 1,0 + 0,5 = 1,5 \text{ W}.$$

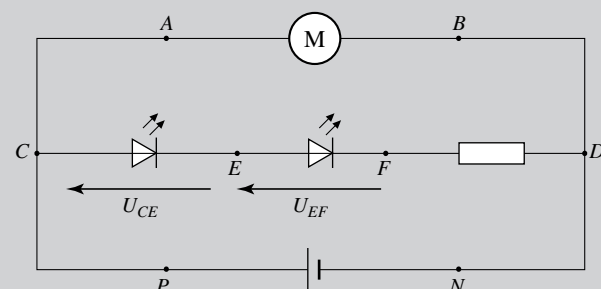
3. $U = 6,0 \text{ V}$, car la tension est la même aux bornes de dipôles associés en dérivation.

$$4. \text{ Lampe de } 1,0 \text{ W} : I_1 = \frac{\mathcal{P}_1}{U} = \frac{1,0}{6,0} = 0,17 \text{ A}.$$

$$\text{Lampe de } 0,5 \text{ W} : I_2 = \frac{\mathcal{P}_2}{U} = \frac{0,5}{6,0} = 0,08 \text{ A}.$$

8. 1. $U_{AB} = U_{CB} = U_{PN} = 6,0 \text{ V}$, car ces branches sont associées en dérivation.

2.



3. D'après la loi d'additivité des tensions :

$$U_{CD} = U_{CE} + U_{EF} + U_{FD}.$$

Donc $U_{FD} = U_{CD} - (U_{CE} + U_{EF})$
 $= 6,0 - 2 \times 2,0 = 2,0 \text{ V}.$

4. a. D'après la loi d'Ohm : $I = \frac{U_{FD}}{R} = \frac{2,0}{18} = 0,11 \text{ A}.$

b. $I = 0,11 \text{ A}$, car les dipôles sont associés en série entre C et D.

9. 1. Le courant circule de B vers C. A est la borne positive et B la borne négative du générateur.

2. U_{BA} ; U_{CA} ; U_{DA} ; U_{EA} et U_{FA} .

3. $U_{BA} = V_B - V_A$; $U_{CA} = V_C - V_A$; $U_{DA} = V_D - V_A$;
 $U_{EA} = V_E - V_A$ et $U_{FA} = V_F - V_A$.

4. $V_B = 12,1 \text{ V}$; $V_C = 12,1 \text{ V}$; $V_D = 7,4 \text{ V}$; $V_E = 1,4 \text{ V}$
 et $V_F = 0 \text{ V}.$

5. $U_{CD} = 4,7 \text{ V}$; $U_{DE} = 6,0 \text{ V}$ et $U_{EF} = 1,4 \text{ V}.$

10. 1. Le point E.

2. Le potentiel décroît de la borne positive du générateur à sa borne négative.

3. Les potentiels de certains points du circuit sont égaux, car ces points sont reliés entre eux par des fils.

4. a. $U_R = 5,71 \text{ V}$; $U_{\text{lampe}} = 5,72 \text{ V}$ et $U_{R'} = 571 \text{ mV}.$

b. Pour R : $I = \frac{U_R}{100} = 0,0571 \text{ A};$

pour R' : $I = \frac{U_{R'}}{10} = 0,0571 \text{ A}.$

c. Égalité de l'intensité du courant en tout point d'un circuit série.

11. 1. Réponse b.

2. Réponse a.

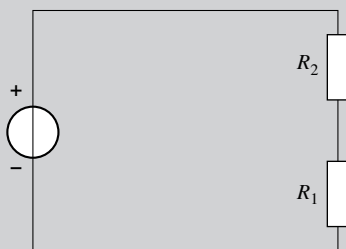
12. 1. $G_1 = 12 \text{ mS}$ et $G_2 = 56 \text{ mS}.$

2. $G_{\text{eq}} = G_1 + G_2 = 77 \text{ mS}.$

3. a. G_{eq} est supérieure à chaque conductance.

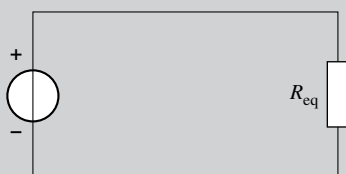
b. Un montage en dérivation permet d'augmenter la valeur de la conductance et de diminuer la valeur de la résistance.

13. 1.



2. a. $R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 = 188 \Omega.$

b.



3. a. $I = \frac{U}{R_{\text{eq}}} = \frac{615}{188} = 0,033 \text{ A}.$

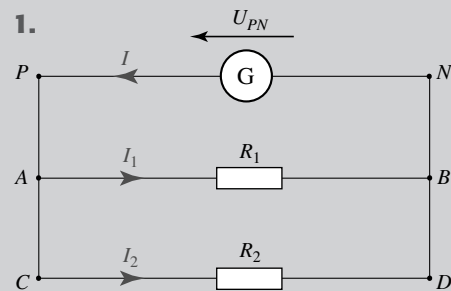
b. Les dipôles sont traversés par un courant de même intensité, car ils sont associés en série.

4. D'après la loi d'Ohm,

$U_1 = R_1 \cdot I = 120 \times 0,033 = 4,0 \text{ V}$

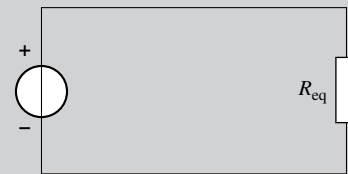
et $U_2 = R_2 \cdot I = 68 \times 0,033 = 2,2 \text{ V}.$

14. 1.



2. a. $\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, donc $R_{\text{eq}} = 43 \Omega.$

b.



3. a. $I = \frac{U}{R_{\text{eq}}} = \frac{6,15}{43} = 0,14 \text{ A}.$

b. Les dipôles ont même tension à leurs bornes, car ils sont associés en dérivation.

$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{6,15}{120} = 0,051 \text{ A}$ et $I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{6,15}{68} = 0,090 \text{ A}.$

15. 1. Montage (1) : $U_{PN} = U_{PA} + U_{AB} + U_{BN}$
 soit $E - r \cdot I = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I$

ou $E = (r + R_1 + R_2 + R_3) \cdot I.$

Montage (2) : $U_{PM} = U_{PA} + U_{AB} + U_{BN} + U_{NM}$
 soit $E = (r + R_1 + R_2 + R_3) \cdot I.$

2. $R_{\text{eq}} = r + R_1 + R_2 + R_3.$

3. $I = \frac{E}{(r + R_1 + R_2 + R_3)}.$

4. $I = 38 \text{ mA}.$

16. 1. $I_{\text{max}} = \frac{\mathcal{P}_{\text{max}}}{E} = \frac{30}{6} = 5,0 \text{ A}.$

2. $R_{\text{min}} = \frac{\mathcal{P}_{\text{max}}}{I_{\text{max}}^2} = \frac{30}{(0,50)^2} = 120 \Omega.$

17. $I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\mathcal{P}_{\text{max}}}{R}} = \sqrt{\frac{0,50}{15}} = 0,18 \text{ A}.$

18. 1. La puissance totale consommée par les appareils est $\mathcal{P} = 3,0 \times 10^3 + (10 \times 40) = 3,4 \times 10^3 \text{ W}$, valeur inférieure à celle fournie par le générateur; donc le vendeur peut les alimenter tous ensemble.

2. La puissance disponible restante est $\mathcal{P} = 5,0 - 3,4$, soit $1,6 \text{ kW}$: cette valeur de puissance n'est pas suffisante pour alimenter une deuxième friteuse.

19. 1. Les montages (1) et (2) sont équivalents si $\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, soit $R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(20)^2}{20 + 20} = 10 \Omega.$

Les trois montages sont équivalents si :

$R_{\text{eq}} = R_{12} + R_3 + r = 10 + 10 + 2,0 = 22 \Omega.$

$$2. I = \frac{E}{R_{eq}}$$

$$3. I = \frac{24}{22} = 1,1 \text{ A.}$$

20. 1. Soit U_1 la tension aux bornes de R_1 et I l'intensité du courant parcourant cette branche du circuit.

D'après la loi d'Ohm, $U_X = R_2 \cdot I$, soit $I = \frac{U_X}{R_2}$.

D'après la loi d'additivité des tensions :

$$U = U_1 + U_X = (R_1 + R_2) \cdot I = (R_1 + R_2) \cdot \frac{U_X}{R_2}$$

$$\text{D'où : } U_X = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U$$

2. La valeur de la tension U_X est égale à une fraction, de valeur inférieure à 1, de la tension U ; d'où l'expression « diviseur de tension ».

$$3. R_2 = R_1 \cdot \frac{U_X}{U - U_X} = 6,0 \times \frac{4,0}{12 - 4,0} = 3,0 \text{ k}\Omega.$$

$$21. 1. a. \text{ Par exemple : } I = \frac{U_2}{R_2} = \frac{4,8}{10} = 0,48 \text{ A.}$$

$$b. \mathcal{P} = U \cdot I = (U_1 + U_2) \cdot I = (7,2 + 4,8) \times 0,48 = 5,8 \text{ W.}$$

$$2. a. U = R_{eq} \cdot I = (R_1 + R_2) \cdot I = (15 + 10) \times 0,200 = 5,0 \text{ V.}$$

$$b. \mathcal{P} = U \cdot I = 5,0 \times 0,200 = 1,0 \text{ W.}$$

$$22. 1. a. I_g = \frac{U_g}{R_{eq}} = U_g \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = 6,0 \left(\frac{2}{10} \right) = 1,2 \text{ A.}$$

$$b. \mathcal{P}_g = U_g \cdot I_g = 6,0 \times 1,2 = 7,2 \text{ W.}$$

$$c. U_1 = U_2 = 6,0 \text{ V.}$$

$$2. a. U_g = R_{eq} \cdot I_g = \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot I_g = \frac{10}{2} \times 0,500 = 2,5 \text{ V.}$$

$$b. I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{2,5}{10} = 0,25 \text{ A.}$$

$$c. \mathcal{P}_g = U_g \cdot I_g = 2,5 \times 0,500 = 1,25 \text{ W.}$$

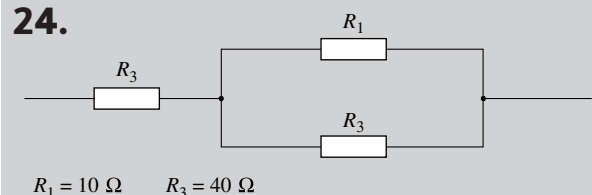
23. 1. On associe le capteur de température en série avec un conducteur ohmique de manière à limiter l'intensité du courant parcourant le capteur.

2. En négligeant la tension aux bornes du capteur, le conducteur ohmique a une résistance de valeur minimale :

$$R_p = \frac{U_g}{I_{max}} = \frac{12}{0,200} = 60 \text{ }\Omega.$$

$$3. \mathcal{P}_j = R_p \cdot I^2 = 60 \times (0,200)^2 = 2,4 \text{ W.}$$

24.



$$R_1 = 10 \text{ }\Omega \quad R_3 = 40 \text{ }\Omega$$

$$R_{eq} = R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}} = 40 + \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{40}} = 40 + \frac{1}{0,125} = 48 \text{ }\Omega.$$

25. 1. Les appareils sont associés en dérivation et sont donc soumis à la tension efficace du secteur, soit environ 230 V.

2. Puissance totale consommée :

$$\mathcal{P}_t = 2300 + 120 + 100 + 540 + 1100 + (12 \times 60) + (5 \times 100) = 5,38 \times 10^3 \text{ W.}$$

Puissance maximale fournie dans chaque contrat :

$$- \text{contrat « ménage » : } \mathcal{P}_1 = 230 \times 15 = 3,4 \text{ kW;}$$

$$- \text{contrat « confort » : } \mathcal{P}_2 = 230 \times 30 = 6,9 \text{ kW;}$$

$$- \text{contrat « grand confort » : } \mathcal{P}_3 = 230 \times 45 = 10,3 \text{ kW.}$$

Ils peuvent choisir le deuxième contrat.

3. Nouvelle puissance totale consommée :

$$\mathcal{P}_t = 5,38 + 2,0 = 7,38 \text{ kW.}$$

Le contrat « confort » n'étant pas suffisant, il faudra choisir le contrat « grand confort » ou ne pas allumer tous les appareils en même temps.

26. 1. Si une lampe grille, toutes les autres s'éteignent, car la lampe grillée se comporte comme un interrupteur ouvert et le courant ne circule plus. Ce choix a été fait par les fabricants, car le coût est moindre : il faut en effet une longueur de fil électrique moins importante pour associer des lampes en série que pour les associer toutes en dérivation.

2. La puissance du générateur se répartit entre les différentes lampes :

$$\mathcal{P}_g = \mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 + \mathcal{P}_3 + \dots$$

($\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \mathcal{P}_3, \dots$ étant les puissances de chaque lampe).

Toutes les lampes, étant associées en série, sont donc traversées par le même courant et :

$$U_g = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

Pour que leur éclat soit le même, leurs puissances nominales de fonctionnement doivent être identiques, ce qui impose la valeur de la tension aux bornes de chaque lampe. On doit donc utiliser des lampes identiques.

3. En remplaçant les lampes grillées par des fils, le circuit est fermé et les lampes peuvent être traversées par un courant. Les 42 lampes traversées par un courant sont soumises à une tension de 12 V, donc chacune d'entre elles a environ 0,29 V à ses bornes : elles sont en surtension et risquent d'être grillées à leur tour.

4. Si dans une branche une lampe est grillée, le courant ne circule plus dans cette branche mais continue à circuler dans les autres. Donc, seule, une partie de la guirlande ne s'allume plus. Cela facilite d'autant plus le repérage des lampes à remplacer.

27. 1. La borne COM du voltmètre est reliée au point N et la borne COM de l'ampèremètre au point A.

$$2. a. I = \frac{E}{r + R_p} = 0,026 \text{ A.}$$

$$b. I = \frac{E}{r + R_p + R_h} = 0,019 \text{ A.}$$

$$3. a. U_{BC} = R_p \cdot I$$

$$\text{et } U_{AB} = R_h \cdot I = U_{PN} - U_{BC} = E - (r + R_p) \cdot I.$$

$$U_{BC} = 4,4 \text{ V et } U_{AB} = 1,4 \text{ V.}$$

$$b. \mathcal{P} = R_p \cdot I^2 = 0,088 \text{ W.}$$

- c. $E = 26,4 \text{ J}$; cette énergie est transférée à l'environnement par effet Joule.
d. $\mathcal{P} = U_{PN} \cdot I = I \cdot (E - r \cdot I) = 0,116 \text{ W}$.
e. $\mathcal{P}_{\text{totale}} = E \cdot I = 0,12 \text{ W}$.
f. La puissance est également consommée par le rhéostat.
g. $\mathcal{P}_{\text{rhéostat}} = 0,116 - 0,088 = 0,028 \text{ W}$.
 $R_h = \frac{\mathcal{P}_{\text{rhéostat}}}{I^2} = 70 \Omega$.

28. 1. Lorsque le moteur est bloqué, la puissance reçue est entièrement convertie par effet Joule : le circuit est alors équivalent à deux conducteurs ohmiques de résistances R et r associés en série au générateur.

$$I = \frac{E}{R + r}, \text{ donc } r = 0,5 \Omega.$$

Lorsque la résistance du rhéostat est nulle, la puissance fournie par le générateur est entièrement consommée par le moteur, donc $E = E' + r \cdot I$.

$$E' = E - r \cdot I = 220 - (0,5 \times 10) = 215 \text{ V}.$$

2. Le rhéostat utilisé permet de faire varier l'intensité du courant dans le circuit.

29. 1. a. $\mathcal{P}_g = 9,0 \times 2,14 \times 10^{-3} = 0,019 \text{ W}$.

b. Les lampes étant identiques, elles reçoivent chacune une puissance $\mathcal{P} = \frac{0,019}{3} = 6,4 \times 10^{-3} \text{ W}$; soit $6,4 \text{ mW}$.

2. a. $\mathcal{P}_g = 9,0 \times 388 \times 10^{-6} = 3,5 \times 10^{-3} \text{ W}$.

b. $\mathcal{P} = \frac{3,5 \times 10^{-3}}{3} = 1,2 \times 10^{-3} \text{ W} = 1,2 \text{ mW}$.

c. Les lampes ne brillent pas, car la puissance électrique qu'elles reçoivent est bien inférieure à leur puissance nominale de fonctionnement.

3. Il s'agit de la lampe L_1 qui est la seule à être parcourue par le courant dont l'intensité a la plus grande valeur.

30. 1. $\mathcal{P}_u = F \cdot v = 80 \times \frac{45}{3,6} = 1,0 \times 10^3 \text{ W}$: on retrouve la valeur minimale de la puissance utile indiquée par le constructeur.

2. La durée de fonctionnement est d'une heure; donc la distance parcourue par le scooter est égale à 45 km .

31. 1. $U_{PN} = E = 12 \text{ V}$, car la résistance interne est négligeable.

2. $Q = I \cdot \Delta t$ et $W_e = U_{PN} \cdot I \cdot \Delta t = E \cdot I \cdot \Delta t$, donc $W_e = E \cdot Q$; Q s'exprime donc en A.s si W_e est en joule.
 $1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3600 \text{ A} \cdot \text{s}$

3. $W_e = 12 \times 80 \times 3600 = 3,5 \times 10^6 \text{ J}$.

$$W_{\text{max}} = 0,75 W_e = 2,6 \times 10^6 \text{ J}.$$

4. $\mathcal{P}_{\text{éclairage}} = (2 \times 55) + (6 \times 5) + 20 = 160 \text{ W}$.

5. $W_{\text{max}} = \mathcal{P}_{\text{éclairage}} \cdot \Delta t$,

$$\text{d'où } \Delta t = \frac{W_{\text{max}}}{\mathcal{P}_{\text{éclairage}}} = 16,2 \times 10^3 \text{ s} = 4,5 \text{ h} : \text{ la batterie}$$

de Maxime sera donc déchargée le lendemain matin.

32. 1. a. $V_A = U_{AM} + V_M = U_{AM} = E = 6,0 \text{ V}$.

$$\text{b. } I_1 = I_2 = \frac{U_{AM}}{2R} = \frac{E}{2R}.$$

$$\text{c. } V_C = U_{CM} + V_M = U_{CM} = \frac{U_{AM}}{2} = \frac{E}{2};$$

$$\text{de même, } V_D = U_{DM} + V_M = U_{DM} = \frac{U_{AM}}{2} = \frac{E}{2}.$$

$$\text{d. } U_{CD} = V_C - V_D = 0 \text{ V}.$$

$$\text{2. a. } I_1 = \frac{E}{2R + r} \text{ et } I_2 = \frac{E}{2R}.$$

$$\text{b. } V_C = U_{CM} + V_M = U_{CM} = (R + r) \cdot I_1 = E \cdot \frac{R + r}{2R + r}.$$

$$V_D = U_{DM} + V_M = U_{DM} = R \cdot I_2 = \frac{E}{2}.$$

$$\text{c. } U_{CD} = V_C - V_D = E \cdot \frac{R + r}{2R + r} - \frac{E}{2} = E \cdot \frac{r}{2(2R + r)}.$$

$$\text{d. } U_{CD} = E \cdot \frac{r}{2(2R + r)} \approx E \cdot \frac{r}{2(2R)} = E \cdot \frac{r}{4R}.$$

$$\text{3. } r = 4R \cdot \frac{U_{CD}}{E} = \frac{4 \times 22 \times 10^3 \times 0,10 \times 10^{-3}}{6,0} = 1,5 \Omega.$$

33. I. 1. Il évite l'utilisation de piles non rechargeables qui contribuent à polluer l'environnement lorsqu'elles ne sont pas recyclées.

2. L'énergie rayonnante captée par les cellules solaires est transformée en énergie électrique transférée aux accumulateurs et stockée sous forme d'énergie chimique. Une partie de cette énergie est également perdue par effet Joule dans les composants électroniques.

$$\text{3. Pour } I = 290 \text{ mA} : U = \frac{2,2}{0,290} = 7,6 \text{ V}.$$

$$\text{Pour } I = 125 \text{ mA} : U = \frac{2,2}{0,145} = 15 \text{ V}.$$

$$\text{4. } E = 11 \times 3600 = 39,6 \text{ kJ}.$$

5. a. Derrière une fenêtre, les vitres réduisent l'énergie rayonnante captée, car le verre absorbe une partie du rayonnement.

b. Les piles ordinaires ne sont pas rechargeables. Lorsqu'elles sont usées, elles ne peuvent qu'être recyclées; elles peuvent d'ailleurs être détruites lors d'une recharge.

c. La recharge doit être telle que le courant entre par le pôle + de l'accumulateur, sinon il fonctionne en générateur.

d. La position du panneau photovoltaïque, face au Soleil, permet de capter le maximum d'énergie rayonnante.

e. L'hiver, l'énergie rayonnante du Soleil est plus faible qu'en été.

II. 1. $\mathcal{P} = 2,2 \text{ W}$.

$$\text{2. } W_e = \mathcal{P} \cdot \Delta t = 31,7 \text{ kJ} = 8,8 \text{ W} \cdot \text{h}.$$

$$\text{3. } W_j = r \cdot I^2 \cdot \Delta t = 1,0 \text{ kJ}.$$

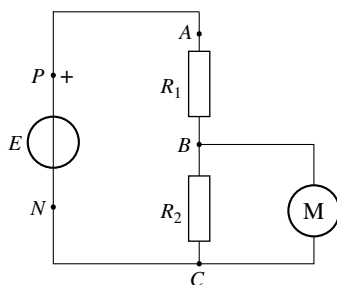
$$\text{4. } \Delta E = W_e - W_j = 30,7 \text{ kJ}.$$

Énoncés

1. Montage diviseur de tension

Pour alimenter un moteur sous une tension voisine de sa tension nominale $U_N = 4,5 \text{ V}$ à l'aide d'une alimentation stabilisée de f.é.m. $E = 9,0 \text{ V}$, on réalise le montage schématisé ci-dessous. Les résistances des conducteurs ohmiques du pont diviseur sont respectivement $R_1 = 22 \Omega$ et $R_2 = 33 \Omega$.

En fonctionnement, dans ces conditions, le moteur a une f.é.m. $E' = 3,0 \text{ V}$; sa résistance interne est $r' = 16 \Omega$.



- Écrire la loi d'additivité des tensions pour chacune des branches du circuit de bornes P et N .
- Écrire la loi des nœuds. Exprimer l'intensité du courant dans la résistance R_2 en fonction de l'intensité I' du courant dans le moteur et de l'intensité I du courant dans le générateur.
- Exprimer l'intensité I' du courant dans le moteur en fonction des données.
- Déterminer chacune des intensités des courants.
- Vérifier que le moteur fonctionne dans des conditions proches des conditions nominales.
- Calculer la puissance électrique :
 - fournie par le générateur ;
 - convertie sous forme mécanique dans le moteur ;
 - dissipée par effet Joule par le pont diviseur et par le moteur.

2. Électrolyseur industriel

L'électrolyse de l'alumine en présence de cryolithe se fait avec une anode en carbone; la cathode est constituée par l'aluminium formé se rassemblant au fond de la cuve d'électrolyse. L'intensité du courant atteint 100 kA . La f.é.m. d'électrolyse est voisine de $1,8 \text{ V}$. La tension entre anode et cathode vaut $4,1 \text{ V}$. La tension entre les bornes de connexion de chaque cuve d'électrolyse est égale à $4,4 \text{ V}$. La densité de courant dans les anodes ne devant pas dépasser $1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, il faut envisager une section de $100\,000 \text{ cm}^2$, soit 10 m^2 pour 100 kA ! Ce que l'on peut réaliser avec une vingtaine d'anodes de $70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ en parallèle pour chaque cuve.

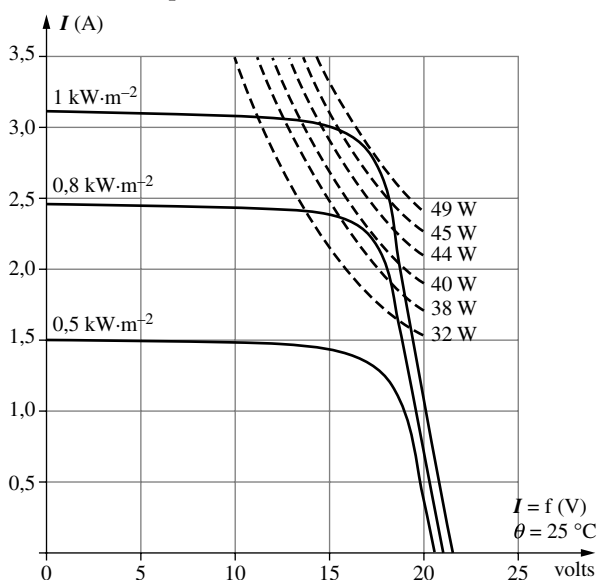
- Calculer la résistance interne d'une cuve d'électrolyse.
- Si l'on considère qu'il y a 20 anodes identiques en parallèle par cuve, déterminer la résistance correspondant à chaque anode.
- Vérifier qu'avec une vingtaine d'anodes en parallèle par cuve, la densité de courant reste de l'ordre de $1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.
- À quoi est due la chute de la tension entre les électrodes et les bornes de connexion d'une cuve ?
 - Évaluer la résistance de connexion d'une cuve.

- Évaluer la puissance dissipée par effet Joule dans la connexion d'une cuve.
- Calculer la puissance dissipée dans les connexions des cuves d'une usine comportant une centaine de cuves.

3. Module photovoltaïque

Le graphique du document ci-après représente les variations de la tension aux bornes d'un panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de la puissance lumineuse surfacique reçue.

La surface du capteur est $S = 33 \text{ m}^2$.



- On appelle intensité de court-circuit I_{cc} la valeur de l'intensité lorsque la tension aux bornes du panneau est nulle. Que vaut I_{cc} pour chacune des puissances lumineuses surfaciques ?
 - Comment varie I_{cc} en fonction de la puissance lumineuse surfacique $\mathcal{P}$?
 - Est-il possible d'écrire une relation simple entre I_{cc} et $\mathcal{P}$?
- Définir l'expression « tension en circuit ouvert ».
 - Que vaut la tension U_0 en circuit ouvert pour chacune des puissances lumineuses surfaciques ?
 - La mesure de la tension U_0 permet-elle de déterminer la puissance lumineuse surfacique avec une bonne précision ?
- Quelle est la puissance maximale délivrée par le panneau pour les puissances lumineuses surfaciques égales à $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ et $0,8 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$?
 Note : La puissance maximale est obtenue lorsque le point caractéristique se trouve dans le « coude » de la courbe caractéristique; elle est indiquée par l'une des courbes qui figurent en haut à droite du diagramme.
 - Donner l'équation de la courbe correspondant à l'indication 49 W en fonction de la tension U et de l'intensité I .
 - Quelle résistance doit-on brancher aux bornes du panneau solaire pour qu'il fournisse la puissance maximale lorsque :
 - $\mathcal{P} = 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$?
 - $\mathcal{P} = 0,8 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$?

Corrigés

1. 1. $U_{PN} = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I_2$; $U_{PN} = R_1 \cdot I + E' + r' \cdot I'$

2. $I = I_2 + I'$; $I_2 = I - I'$

3. $U_{PN} = (R_1 + R_2) \cdot I - R_2 \cdot I'$;

$$I = \frac{U_{PN}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 \cdot I'}{R_1 + R_2};$$

or $U_{PN} = R_1 \cdot I + E' + r' \cdot I'$;

donc $U_{PN} = \frac{R_1 \cdot U_{PN}}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot I'}{R_1 + R_2} + E' + r' \cdot I'$;

On peut tirer I' de cette relation.

4. $\frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,40$; $\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 13,2$; $I' = 0,082$ A;

$$U_{BC} = E' + r' \cdot I'$$

$$U_{BC} = 3,0 + 16 \times 0,082 = 4,32 \approx 4,3 \text{ V};$$

$$I_2 = \frac{4,32}{33} = 0,131$$
; $I_2 = 0,13$ A;

$$I = 0,082 + 0,131 = 0,213 \text{ A};$$

$$I = 0,21 \text{ A ou } I = \frac{4,68}{22} = 0,21 \text{ A}.$$

5. $U_{BC} = E' + r' \cdot I' = 4,3 \text{ V} \approx 4,5 \text{ V}$ (moins de 5 % d'écart).

6. a. $\mathcal{P}_g = 1,9 \text{ W}$;

b. $\mathcal{P}_m = 0,25 \text{ W}$;

c. $\mathcal{P}_j = 0,11 \text{ W}$ pour le moteur; $\mathcal{P}_j' = 1,6 \text{ W}$ pour le potentiomètre.

2. 1. $U_{AC} = E' + r' \cdot I$; $r' = \frac{U_{AC} - E'}{I}$;

$$r' = 2,3 \times 10^{-5} \Omega.$$

2. La résistance unitaire est 20 fois supérieure à la résistance équivalente $r'_u : r'_u = 20 r'$;

$$r'_u = 4,6 \Omega.$$

3. La section totale est $20 \times 70 \times 70 = 98\,000 \text{ cm}^2$.

$$\frac{100\,000}{98\,000} = 1,02 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}, \text{ soit } 1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}.$$

4. a. Elle est due à la résistance des barres de connexion.

b. $R = \frac{(4,4 - 4,1)}{100\,000} = 3 \times 10^{-6} \Omega.$

5. a. $\mathcal{P}_j = R \cdot I^2$; $\mathcal{P}_j = 30\,000 \text{ W}.$

b. $\mathcal{P}_j \text{ totale} = 100 \times 30\,000 = 3 \times 10^6 \text{ W} = 3 \text{ MW}$ (rien que dans les barres de connexion!).

3. 1. a. $I_{cc} = 3,2 \text{ A}; 2,5 \text{ A}; 1,55 \text{ A}.$

b. I_{cc} est d'autant plus grande que la puissance rayonnante est plus grande.

$\mathcal{P} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	1 000	800	500
$I_{cc} (\text{A})$	3,2	2,5	1,55
$\frac{I_{cc}}{\mathcal{P}}$	$3,2 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-3}$

Pratiquement, on peut dire que I_{cc} est proportionnelle à $\mathcal{P}$ (il n'y a que 3 % d'écart).

c. On peut écrire $I_{cc} = k \cdot \mathcal{P}$ avec $k = 3,1 \text{ A} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{m}^2$.

2. a. La tension en circuit ouvert correspond à la tension aux bornes du panneau ne débitant pas dans un circuit extérieur : $U_{PN} (I = 0) = U_0$.

b. $U_0 = 21,0 \text{ V}; 20,5 \text{ V}; 20,2 \text{ V}.$

c. U_0 varie peu avec la puissance rayonnante.

Donc, on ne peut pas utiliser cette grandeur pour mesurer la puissance rayonnante avec une bonne précision.

3. a. Si on observe les courbes tracées en haut et à gauche, on voit qu'elles sont repérées en watt (W) : on peut penser que leur fonction est de donner cette puissance maximale. Pour $1 \text{ kW}^{-1} \cdot \text{m}^2$, on lit alors $\mathcal{P}_{\max} = 49 \text{ W}$; pour $0,8 \text{ kW}^{-1} \cdot \text{m}^2$, on trouve $\mathcal{P}_{\max} = 40 \text{ W}.$

On peut le vérifier en construisant la courbe $\mathcal{P} = U \cdot I$ en fonction de U_{PN} .

b. La courbe de niveau 49 W a pour équation :

$$I = 49 / U_{PN}.$$

En effet, les coordonnées (U_{PN}, I) d'un point de cette courbe vérifient la relation :

$$U_{PN} \cdot I = 49, \text{ avec } U_{PN} \text{ en volt, } I \text{ en ampère et } 49 \text{ en watt.}$$

c. On relève les coordonnées du point de contact de la courbe de niveau avec la caractéristique. On trouve :

– pour $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ et $\mathcal{P}_{\max} = 49 \text{ W}$, $U_{PN} = 17 \text{ V}$

et $I = 2,9 \text{ A}$; alors $R = \frac{17}{2,9} = 5,9 \Omega$;

– pour $0,8 \text{ kW}^{-1} \cdot \text{m}^2$ et $\mathcal{P}_{\max} = 40 \text{ W}$, $U_{PN} = 17 \text{ V}$

et $I = 2,3 \text{ A}$; alors $R = \frac{17}{2,3} = 7,4 \Omega.$

Magnétisme

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

III. Électrodynamique

B. Magnétisme. Forces électromagnétiques

1. Champ magnétique

2. Champ magnétique créé par un courant

Objectifs

À cause de l'importance de l'attraction électrique entre charges de types opposés, la matière est presque toujours macroscopiquement neutre et les forces électrostatiques alors inobservables. Aussi ce sont les forces « magnétiques » qui ont au niveau macroscopique le rôle technique et industriel le plus important. De plus, ces forces entraînent des effets mécaniques immédiatement observables, sans précautions particulières, permettant des manipulations aisées.

Enfin, on dispose là d'une interaction à distance, bien visible et contrôlable ; c'est une situation de choix pour introduire pour la première fois un concept nouveau et fondamental, celui de champ, grandeur qui caractérise localement l'espace où se produisent les effets étudiés, mécaniques dans le cas présent.

Contenus

1. Champ magnétique

- Action d'un aimant, d'un courant continu, sur une très courte aiguille aimantée.
- Vecteur champ magnétique $\vec{B}$: direction, sens, valeur et unité.
- Exemples de lignes de champ magnétique ; champ magnétique uniforme.
- Superposition de deux champs magnétiques (addition vectorielle).

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Une petite aiguille aimantée permet d'obtenir la direction et le sens du champ magnétique dans une petite région de l'espace.
- Les caractéristiques du vecteur champ magnétique.

- Réaliser des spectres magnétiques.
- Utiliser une sonde à effet Hall.
- Les lignes de champ magnétique se referment sur elles-mêmes.
- Connaître la topographie du champ magnétique créé par :
 - un courant rectiligne ;
 - un solénoïde.
- Savoir que la valeur de $\vec{B}$ dépend de la géométrie du courant, de son intensité ainsi que du point de mesure.

Exemples d'activités

- Étude documentaire sur l'histoire du magnétisme et de l'électromagnétisme*.
- Expérience de l'aimant brisé.
- Comparaison de deux champs magnétiques.
- Mise en œuvre d'expériences montrant les caractéristiques du champ magnétique créé par :
 - un courant rectiligne ;
 - une bobine ou un solénoïde.
- Comparaison du champ externe d'un solénoïde et celui d'un barreau aimanté.
- Mise en évidence du champ magnétique terrestre.

Commentaires

Champ magnétique

Toute étude des actions mécaniques s'exerçant entre des aimants, ainsi que leur interprétation, sont exclues ; l'action sur une petite aiguille aimantée est constatée et sert simplement de support expérimental pour introduire la notion de champ magnétique. L'unité est donnée et la valeur d'un champ magnétique est mesurée par une sonde spécifique (teslamètre).

L'expression du champ magnétique créé par un courant rectiligne n'est pas au programme ; celle du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde de grande longueur, si elle est donnée, le sera sous la forme :

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot I \text{ avec } \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ SI.}$$

Remarque : On appelle « champ » toute grandeur, fonction des coordonnées de position d'un point de l'espace, utilisée pour décrire localement les propriétés de la matière ou pour interpréter les phénomènes qui

*Activités pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication.

s'y produisent; on parle ainsi de « champ de pression » (exemple des cartes météo); de même la distribution spatiale de température est un « champ de température » même si l'expression est peu utilisée; ce sont deux exemples de champs scalaires. Si la grandeur est vectorielle, on parle de « champ vectoriel » (exemples : champ électrique, champ magnétique, champ de vitesses dans un fluide).

Matériel

Cours

➤ Activité 1

- Un aimant droit.
- Une boussole.
- Des aiguilles aimantées sur pivot vertical.

➤ Activité 2

- Une tige conductrice horizontale (pour l'expérience d'OERSTED).
- Une batterie d'accumulateurs et un rhéostat.
- Une aiguille aimantée sur pivot vertical.

➤ Paragraphe 2

- Un teslamètre.
- Un aimant en U; un aimant droit et un aimant torique.
- Vitres.
- Limaille de fer (pour réaliser des spectres magnétiques).

➤ Activité 3

- Deux aimants droits.
- Un teslamètre.
- Une feuille de papier millimétré.

➤ Paragraphe 3

- Une batterie d'accumulateurs et un rhéostat.
- Une tige conductrice verticale traversant une plaque transparente (pour réaliser le spectre du champ créé par un courant rectiligne).
- Limaille de fer.
- Une bobine permettant de réaliser le spectre magnétique.
- Un solénoïde « long ».
- Un teslamètre.
- Un bonhomme d'AMPÈRE.

Rechercher et expérimenter

- Un générateur.
- Un rhéostat.
- Un ampèremètre.
- Un solénoïde avec enroulement double et un nombre de spires connu.
- Un teslamètre.

Déroulement du chapitre

➤ Objectifs

- Savoir qu'une aiguille aimantée indique la direction et le sens du champ magnétique.

- Donner les caractéristiques du vecteur champ magnétique.
- Connaître la topographie des champs créés par un fil ou par un solénoïde parcouru par un courant.
- Savoir que la valeur du champ magnétique créé par un courant dépend de l'intensité du courant et de la géométrie du circuit.

Le champ magnétique n'est pas étudié dans les classes antérieures en physique-chimie. Il n'y a donc pas de prérequis, si ce n'est concernant le champ magnétique terrestre évoqué en S.V.T. Les connaissances des élèves provenant de la vie quotidienne peuvent concerner les effets d'un aimant sur certains objets métalliques et le fait que l'aiguille d'une boussole indique le nord.

Activités préparatoires

A. Champ magnétique terrestre

Ce texte de vulgarisation scientifique évoquant le champ magnétique terrestre pourrait permettre de donner l'envie aux élèves de savoir ce qu'est un champ magnétique.

Réponses aux questions

1. C'est le champ magnétique terrestre qui donne à une boussole son orientation (indication du nord et du sud); ceci permet alors d'orienter correctement une carte ou de choisir une direction de navigation.
2. Un magnétomètre mesure l'intensité d'un champ magnétique.
3. Un courant de convection est un déplacement de fluide. Par exemple, il y a un courant de convection lorsque de l'air froid passant contre un radiateur se réchauffe et s'élève dans une pièce (ces courants ont déjà été rencontrés lors des modes de transfert thermique au chapitre 7).

B. L'expérience d'OERSTED : une découverte historique

La gravure représente OERSTED expérimentant dans un laboratoire. Le texte évoque la découverte des effets magnétiques des courants électriques.

Réponses aux questions

1. Un aimant peut attirer des objets en fer, nickel ou chrome.
2. Dans la vie courante, on trouve des aimants dans les haut-parleurs, dans certaines fermetures de portes (portes des réfrigérateurs), comme plots de fixation de documents sur des tableaux en acier...
3. Une boussole sert à indiquer la direction du nord (et du sud) magnétique. Elle permet de s'orienter.

Cours

1. Comment détecter un champ magnétique ?

1.1 Le champ magnétique terrestre

On commence par présenter le champ magnétique terrestre. Les élèves peuvent en connaître l'existence, et savent tout au moins qu'une boussole s'oriente d'une façon particulière.

On indique qu'une aiguille aimantée peut jouer le rôle de détecteur de champ magnétique par le fait qu'elle subit une action mécanique qui lui impose une orientation particulière. On distingue les pôles Nord et Sud d'une aiguille.

1.2. Champ magnétique d'un aimant

En positionnant une aiguille aimantée à proximité d'un aimant, celle-ci n'est plus soumise uniquement au champ magnétique terrestre; elle subit l'influence de l'aimant qui exerce une action à distance. L'aimant crée, dans son environnement, un champ magnétique (n'oublions pas que l'aiguille aimantée est un détecteur de champ magnétique). Il sera vu ultérieurement que ces champs, créés par les aimants et les courants, supplantent souvent le champ magnétique terrestre...

➤ Activité 1

Réponses aux questions

1. On peut dire que l'aimant crée un champ magnétique parce que, à proximité de celui-ci, l'aiguille aimantée subit une action mécanique qui supprime celle du champ magnétique terrestre.
2. Les deux pôles de l'aimant droit n'ont pas la même action sur l'aiguille aimantée : l'un des pôles attire la pointe Nord de l'aiguille, l'autre sa pointe Sud.

1.3 Champ magnétique créé par un courant

On constate (en relation avec l'activité préparatoire B) qu'un courant est à l'origine d'un champ magnétique, l'aiguille aimantée servant toujours de détecteur.

➤ Activité 2

Réponse à la question

En l'absence de courant dans la tige conductrice, l'aiguille est soumise à l'action du champ magnétique terrestre. Lorsqu'un courant traverse la tige, l'aiguille subit une déviation dont le sens dépend du sens du courant. Cette déviation est d'autant plus importante que l'intensité du courant est intense.

2. Comment caractériser un champ magnétique ?

2.1 Le vecteur champ magnétique

Le fait que l'aiguille aimantée soumise à un champ magnétique adopte une position d'équilibre particulière conduit à penser que le champ magnétique peut être caractérisé, en un point donné, par une direction directement liée à la direction du grand axe de l'aiguille (ceci est posé conventionnellement). On oriente conventionnellement le grand axe de l'aiguille du Sud vers le Nord.

Le vecteur champ magnétique est introduit : il caractérise une région de l'espace où une aiguille aimantée subit une action mécanique qui lui impose une certaine orientation.

2.2 Visualisation d'un champ magnétique

On présente les spectres de différentes sources de champ magnétique.

Il convient de faire comprendre le rôle des grains de limaille.

La transition entre une aiguille aimantée (notre détecteur de champ magnétique) et un grain de limaille peut être faite en utilisant le boîtier du *document* 10, contenant des petites tiges de fer qui s'orientent dans le champ exploré. Chaque grain, dans le champ, se comporte comme un petit aimant et s'oriente selon la direction et le sens du champ, là où il se trouve.

On fait admettre qu'à des lignes de champ parallèles correspond un champ uniforme qui peut en chacun de ses points être décrit par un seul et même vecteur champ magnétique.

2.3 Superposition de champs magnétiques

L'activité 3 permet de traiter le sujet : dans une région où deux (ou plusieurs) champs magnétiques se superposent, l'aiguille aimantée prend la direction de la somme vectorielle des vecteurs champ.

À proximité d'un aimant, une aiguille est soumise à un champ magnétique dont le vecteur champ est égal à la somme vectorielle du champ dû à l'aimant et du champ magnétique terrestre. Si elle est très proche de l'aimant, l'influence du champ magnétique terrestre est négligeable.

3. Quelles sont les propriétés des champs magnétiques créés par des courants ?

3.1 Champ magnétique créé par un fil rectiligne parcouru par un courant

On réalise un spectre, dans un plan perpendiculaire au fil conducteur.

On introduit alors les « règles d'orientation de l'espace » : trièdre direct $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, bonhomme d'AMPÈRE, règle utilisant les doigts de la main droite (pouce, index, majeur).

3.2 Champ magnétique créé par un solénoïde

Extérieurement, le spectre d'un solénoïde long est semblable à celui d'un aimant droit. On est amené à désigner les faces du solénoïde, face nord et face sud, comme on désigne les pôles d'un aimant.

À l'intérieur, le champ magnétique est uniforme (lignes de champ parallèles). On peut vérifier que la valeur du champ est la même en différents points s'ils ne sont pas à proximité des extrémités.

Une règle d'orientation permet de relier le sens du courant à l'orientation des lignes de champ et de distinguer les faces nord et sud.

La valeur du champ intérieur est donnée par l'expression $B = \mu_0 \cdot n \cdot I$.

On généralise en indiquant que la valeur du champ magnétique créé en un point par un courant est toujours, dans l'air, proportionnelle à l'intensité du courant : $B = k \cdot I$.

3.3 Champ magnétique en présence de matériau ferromagnétique

Il n'y a plus proportionnalité de B à I si l'on a un milieu ferromagnétique.

Rechercher et expérimenter

1. De quels paramètres dépend le champ magnétique créé par un solénoïde ?

Il s'agit de retrouver la proportionnalité de B à I et à $n = \frac{N}{L}$, à l'intérieur d'un solénoïde.

Réponses aux questions

1. Une aiguille aimantée sur pivot adopte une direction et un sens particuliers sous l'effet d'un champ magnétique.
2. À l'intérieur du solénoïde, le champ magnétique est proportionnel à l'intensité du courant dans le solénoïde. Le tracé de $B(I)$ est une droite passant par l'origine.
3. $B = k' \cdot I$. La valeur de k' dépend du solénoïde. Avec 500 spires par mètre : $k' = 6,3 \times 10^{-4}$ SI.
4. a. Avec 500 spires par mètre et $k' = 6,3 \times 10^{-4}$ SI, il faudrait un courant d'intensité $I = 1,6 \times 10^3$ A pour créer un tel champ.
b. Le solénoïde ne peut supporter un courant d'une telle intensité.
5. En faisant varier N , en mesurant le champ magnétique B et en comparant les valeurs des rapports $\frac{B}{N}$, on montre que le champ magnétique est proportionnel au nombre de spires N à l'intérieur d'un solénoïde de longueur L donnée.
6. a. Pour un solénoïde de longueur L donnée, $B = k'' \cdot I \cdot N$.
b. On montre que $k'' = \frac{\mu_0}{L}$ et que l'on a bien $B = \left(\frac{\mu_0}{L}\right) \cdot I \cdot N$.
7. a. Il y a conformité aux incertitudes expérimentales près.
b. $n = 1,6 \times 10^6$ spires par mètre ; c'est impossible.

2. Comment sont créés les champs magnétiques en I.R.M. ?

Le texte est une ouverture sur l'utilisation de champs magnétiques intenses en médecine.

Réponses aux questions

1. Non : certains champs magnétiques sont produits par des aimants permanents, d'autres par des électroaimants.
2. L'effet Joule est responsable de l'échauffement des bobines des aimants résistifs.
3. C'est la résistance des supraconducteurs que l'on tend à rendre nulle.
4. On cherche à éviter les pertes d'énergie par effet Joule, tout en produisant des courants d'intensité élevée qui permettent de créer des champs magnétiques très intenses. Cependant, le refroidissement des bobines nécessite de l'énergie.

Aborder les difficultés du chapitre

Nous précisons l'utilisation des règles d'orientation permettant de déterminer la direction et le sens du

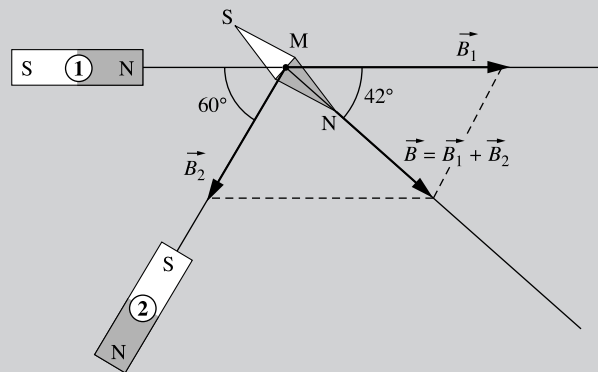
champ magnétique créé par un courant rectiligne, puis par un solénoïde.

Une difficulté qui pourra être soulignée réside dans la représentation des solénoïdes. Il est souhaitable d'épaissir le trait de la partie avant de chaque spire et éventuellement de représenter en pointillés la partie arrière.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. 1. On mesure un champ magnétique à l'aide d'un teslamètre.
2. Le vecteur champ magnétique $\vec{B}_1$ est dirigé selon l'axe de l'aimant ①, de gauche à droite ; le vecteur $\vec{B}_2$ est dirigé selon l'axe de l'aimant ②, de haut en bas (voir schéma ci-dessous).
3. Le champ résultant est représenté par un vecteur $\vec{B}$ égal à la somme vectorielle $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$; $\vec{B}$ est orienté de haut en bas et de gauche à droite ; angle $(\vec{B}_1, \vec{B}) = 42^\circ$ environ et $B = 2,2$ mT environ (déterminé à l'aide du schéma ci-dessous).



2. 1. Le conducteur est un fil rectiligne, car ses lignes de champ sont circulaires.
2. L'aiguille aimantée permet de déterminer l'orientation de la ligne de champ dans le sens S-N de l'aiguille aimantée. La ligne de champ est orientée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.
3. Le conducteur est perpendiculaire au plan contenant la ligne de champ circulaire et passe par son centre. Le courant circule du bas vers le haut.
4. Les autres lignes sont des cercles de même centre que celui de la ligne représentée. L'ensemble des lignes de champ représente un spectre magnétique. On peut les matérialiser avec de la limaille de fer.
5. Le vecteur $\vec{B}_M$ est tangent à la ligne de champ, de sens donné par l'orientation de la ligne de champ. À l'échelle 1 cm pour 1 mT, on trace un vecteur de 2,5 cm de longueur dont l'origine est située au point M.
3. 1. a. À l'intérieur du solénoïde, le champ magnétique est uniforme parce que les lignes de champ sont parallèles (en déplaçant un teslamètre à l'intérieur, on obtient une valeur constante) ; le champ est caractérisé par le même vecteur en tous ses points (mêmes direction, sens et valeur).
b. et c. Voir le document 17, page 202.

2. a. La valeur du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde : $B = 3,1 \text{ mT}$.

b. En C , la valeur du champ magnétique est inférieure à celle du champ à l'intérieur, d'où :

$$B_C = 1,5 \text{ mT}.$$

c. Si l'intensité du courant est deux fois plus faible, la valeur du champ, proportionnelle à l'intensité du courant, est divisée par deux.

d. La valeur de l'intensité du courant étant deux fois plus grande, les valeurs du champ magnétique sont deux fois plus grandes :

- en A : $B_A = 6,2 \text{ mT}$;
- en C : $B_C = 3 \text{ mT}$.

Exercices

1. 1. On peut mettre en évidence la présence d'un champ magnétique dans une région de l'espace avec une aiguille aimantée.

2. Un aimant et un conducteur parcouru par un courant sont des sources de champ magnétique.

2. Les réponses exactes sont **b.**, **c.**, **e.**

3. 1. Sur Terre, l'aiguille aimantée d'une boussole prend une direction sud (magnétique), nord (magnétique).

2. Si l'on approche un aimant de cette boussole ; elle change d'orientation.

3. Une boussole, dans une région de l'espace où ne régnerait aucun champ magnétique adopterait n'importe quelle orientation.

4. 1. On peut réaliser le spectre magnétique d'un aimant en plaçant horizontalement sur l'aimant une plaque de verre et en y saupoudrant de la limaille de fer dont les grains s'orientent selon les lignes de champ de l'aimant.

2. et 3. Le *document 7 a*, page 200, représente quelques lignes de champ d'un aimant droit ainsi que quelques vecteurs champs magnétiques en différents points (sans considération d'échelle).

5. Propositions fausses rectifiées :

a. Les lignes de champ d'un aimant sortent *par le pôle Nord et rentrent par le pôle Sud*.

b. Dans l'entrefer d'un aimant en U, les lignes de champ *sont parallèles*.

d. Un champ magnétique uniforme est un champ décrit par des vecteurs champ qui sont *égaux* en chacun de ses points. *Ce champ uniforme est constant si ces vecteurs ne changent pas au cours du temps*.

6. 1. L'observateur d'AMPÈRE est placé sur le fil, le courant entrant par les pieds et sortant par la tête. Regardant le point M où il veut connaître le champ, il voit le vecteur $\vec{B}_M$ dirigé sur sa gauche.

2. Voir les *documents 14* (page 201) et *18* (page 203).

7. • Les droites parallèles correspondent aux lignes de champ à l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant ou à l'entrefer d'un aimant en U.

• Les lignes concentriques correspondent aux lignes

de champ dans un plan perpendiculaire à un fil conducteur rectiligne parcouru par un courant.

• Les courbes non sécantes correspondent aux lignes de champ à l'extérieur d'un solénoïde parcouru par un courant, à un aimant droit ou à l'extérieur de l'entrefer d'un aimant en U.

8. 1. Le nord géographique est l'intersection de l'axe de rotation de la Terre avec la surface du globe.

2. Non, les pôles géographiques et magnétiques ne sont pas confondus.

3. Non, le nord magnétique terrestre n'est pas le pôle Nord de « l'aimant Terre » : c'est le pôle Sud puisqu'il attire le pôle Nord de l'aiguille aimantée.

4. Ce déplacement peut être une source d'erreur pour s'orienter : les cartes indiquent l'écart angulaire entre la direction sud-nord géographique et la direction sud-nord magnétique, donnée par la boussole. Si le pôle Nord magnétique se déplace, l'écart indiqué n'est plus valable et la navigateur « perd le nord »... géographique!

9. 1. b. Le courant circule de droite à gauche.

2. Le fil étant dans le plan du méridien magnétique du lieu, si on coupe le courant, l'aiguille prend la direction de $\vec{B}_h$, parallèle au fil, et le sens de $\vec{B}_h$ de la droite vers la gauche (direction sud-nord magnétiques).

3. $\vec{B} = \vec{B}_h + \vec{B}_f$; le champ $\vec{B}_f$ créé par le fil est horizontal et change de sens si on inverse le sens du courant. L'aiguille tourne alors dans le sens des aiguilles d'une montre.

4. Si on augmente le courant, la rotation de l'aiguille est plus importante.

10. 2. Chaque vecteur $\vec{B}$ est parallèle à l'axe de l'aiguille, son sens est du pôle Sud de celle-ci vers le pôle Nord.

3. Le pôle visible de l'aimant est le pôle Sud, car il attire les pôles Nord des aiguilles.

11. 1. Une ligne de champ est une ligne orientée telle qu'en chacun de ses points le champ magnétique peut être représenté par un vecteur tangent à la ligne de champ en ce point et dont le sens correspond à l'orientation de celle-ci.

2. Voir le *document 8 b*, page 200.

3. Le champ est uniforme dans l'entrefer de l'aimant, car les lignes de champ sont parallèles.

12. 1. Parce que le champ magnétique en O est modifié par la présence de l'aimant ②. Le pôle Nord de l'aimant ② est le plus proche de l'aiguille.

2. et 3. Graphiquement, on obtient $B_2 = 2,0 \text{ mT}$ et $B = 3,6 \text{ mT}$.

$$B = B_1 / \cos 34^\circ = 3,6 \text{ mT} ;$$

$$B_2 = B_1 \cdot \tan 34^\circ = 2,0 \text{ mT}.$$

13. Toutes les réponses sont inexactes ou à compléter.

a. À l'intérieur du solénoïde, les lignes de champ magnétique du solénoïde sont des droites parallèles à l'axe.

- b.** Le vecteur champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est de sens opposé au sens au vecteur $\vec{u}$.
- c.** Si l'intensité I du courant est divisée par 2, la valeur du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est divisée par 2.
- d.** Si le nombre de spires est doublé pour une même longueur, la valeur du champ magnétique est multipliée par deux.

14. 1. a. $n = \frac{N}{L}$, n est le nombre de spires par mètre.

b. $n = \frac{1200}{0,60} = 2000$ spires par mètre.

2. $B = 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 2000 \times 3,00 = 7,54 \times 10^{-3}$ T.

3. Règle du bonhomme d'AMPÈRE.

4. À l'intérieur : les lignes de champ sont parallèles à l'axe ; à l'extérieur, les lignes sont similaires à celles d'un aimant droit (voir le document 17, page 202).

15. 1. Le vecteur champ magnétique est parallèle à l'axe du solénoïde, de sens donné par une règle d'orientation, de valeur $B = \mu_0 I \cdot \frac{N}{L} = \mu \cdot n_0 \cdot I$.

$B = 4 \pi \times 10^{-7} \times 2,00 \times 1000 = 2,51 \times 10^{-3}$ T.

2. a. Les deux champs étant de même direction et de même sens : $B' = 2 B = 5,02 \times 10^{-3}$ T.

b. Les deux champs sont de sens opposé, soit $B'' = 0$ T.

3. a. $B = 3,51 \times 10^{-3}$ T.

b. $B = 1,51 \times 10^{-3}$ T.

16. 1. Le champ créé $B = B_h = \mu_0 I \cdot \frac{N}{L} = \mu_0 \cdot I \cdot n$. D'où $I = 8,0 \times 10^{-3}$ A.

2. a. L'axe du solénoïde doit être horizontal et contenu dans le plan du méridien magnétique. Le sens du courant doit être tel que le champ créé par le solénoïde soit de sens opposé à la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

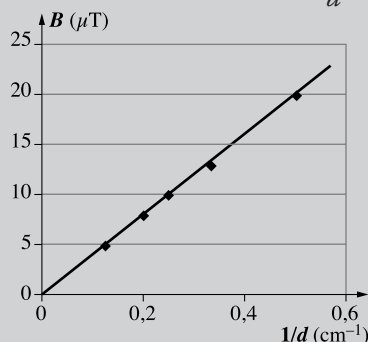
b. L'aiguille prend une position quelconque, car le champ résultant à l'intérieur du solénoïde a une valeur nulle.

17. 1. Faux : $\vec{B}_s$ est orienté vers l'est. Il faut pour cela un courant de sens opposé à celui représenté sur la figure 2 d'après la règle bonhomme d'AMPÈRE.

2. Vrai : $\tan 45^\circ = 1 = \frac{B_s}{B_h}$.

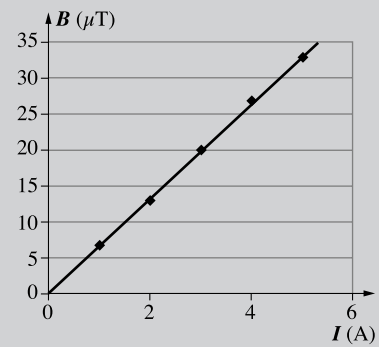
3. Faux : si I augmente, B_s augmente, donc $\tan \alpha$ et α augmentent aussi.

18. 1. a. B est fonction linéaire de $\frac{1}{d}$.



b. Pour $I = 2$ A : $B = 0,4 \times \frac{1}{d}$ avec d en m et B en μT.

2. a. B est proportionnel à I .



b. Pour une distance $d = 3$ cm : $B = 6,7 \cdot I$ avec B en μT.

3. B est proportionnel à I et à $\frac{1}{d}$, donc $B = k \cdot \frac{I}{d}$.

Pour $I = 2$ A et $d = 3$ cm, on a $B = 13 \times 10^{-6}$ T ;

d'où : $k = \frac{13 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{-2}}{2}$

$k = 2 \times 10^{-7}$ T · A⁻¹ · m.

19. 1. Ces vecteurs sont tangents à la ligne de champ passant par chacun des points et leur sens est donné par celui des lignes.

2. En O , la valeur du champ serait nulle.

3. La valeur du champ B est proportionnelle à I :

$$B = 1,8 \times \frac{5}{3} = 3 \text{ mT.}$$

20. 1. Il n'est pas nécessaire de tenir compte de la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre, car sa valeur est environ 100 fois plus faible que celle du champ créé par le courant.

2. Par une représentation graphique de B en fonction de I (avec un tableur ou manuellement) ou par une régression linéaire faite à l'aide d'une calculatrice, on trouve que B est fonction linéaire de I telle que :

$$B = 0,66 \times 10^{-3} \cdot I.$$

3. $B = \mu_0 I \cdot \frac{N}{L}$;

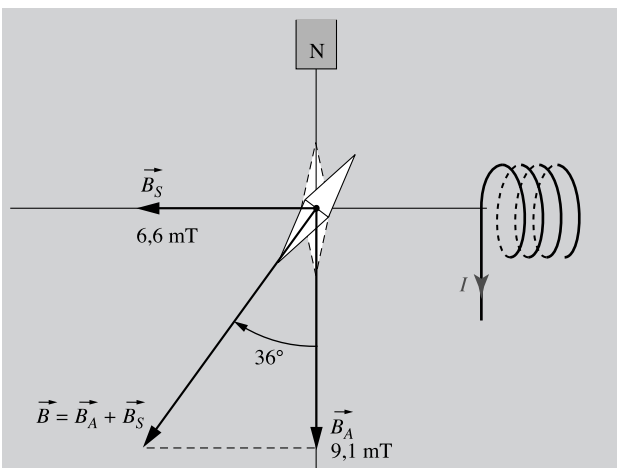
$$N = \frac{B}{I} \cdot \frac{L}{\mu_0} = \frac{0,66 \times 10^{-3} \times 0,40}{4\pi \times 10^{-7}} = 210 \text{ spires.}$$

4. L'aiguille est orientée comme le vecteur $\vec{B} = \vec{B}_A + \vec{B}_s$, somme vectorielle au point O des champs dus à l'aimant A et au solénoïde S .

La valeur B_A peut être déterminée par construction ou par le calcul :

$$B_A = \frac{B_s}{\tan 36^\circ} \text{ avec } B_s = 0,66 \times 10^{-3} \cdot I = 6,6 \times 10^{-3} \text{ T,}$$

$$B_A = 9,1 \text{ mT.}$$



21. 1. La direction de la composante horizontale du champ magnétique terrestre est celle indiquée par l'aiguille en l'absence de courant; elle est donc perpendiculaire à l'axe du solénoïde.

2. a. Le champ magnétique créé par la bobine est parallèle à son axe et orienté de x' vers x .

b. Sur le schéma, la partie avant d'une spire est parcourue de haut en bas par le courant d'après les règles d'orientation.

c. Champ créé par le solénoïde :

$$B_s = B_h \cdot \tan 36^\circ = 15 \text{ mT};$$

$$\text{champ résultant : } B = \frac{B_h}{\cos 36^\circ} = 25 \text{ mT}.$$

22. 1. Le champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde est uniforme, parallèle à l'axe et de sens tributaire du sens du courant.

$$2. B_s = \mu_0 I \cdot \frac{N}{L} = \frac{4 \pi \times 10^{-7} \times 0,500 \times 800}{0,40} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ T}.$$

3. Le vecteur champ magnétique $\vec{B}_s$ créé par le solénoïde est parallèle à son axe, son sens de droite vers la gauche (règle d'orientation).

4. La composante horizontale du champ terrestre $\vec{B}_h$ est perpendiculaire à l'axe du solénoïde (du haut vers le bas, par exemple), le champ résultant $\vec{B} = \vec{B}_s + \vec{B}_h$ est situé entre $\vec{B}_s$ et $\vec{B}_h$ et fait un angle α avec ce dernier.

$$b. \tan \alpha = \frac{B_s}{B_h}, \cos \alpha = \frac{B_h}{B} \text{ et } \sin \alpha = \frac{B_s}{B}.$$

$$c. B_s = B_h; \tan \alpha = 1; \alpha = 45^\circ.$$

$$5. \text{ Pour } I = 8 \text{ mA}, B_s = B_h = 2 \times 10^{-5} \text{ T}.$$

23. 1. Voir le schéma de l'exercice 19, page 213.

$$2. \frac{B_b}{B_s} = \frac{(0,72 \cdot \mu_0 \cdot N \cdot \frac{I}{R})}{(\mu_0 I \cdot 2 \frac{N}{L})}.$$

$$\text{Avec } L = R, \frac{B_b}{B_s} = \frac{0,72}{2} = 0,36.$$

Ces deux champs sont du même ordre de grandeur. L'espace où règne un champ uniforme est accessible.

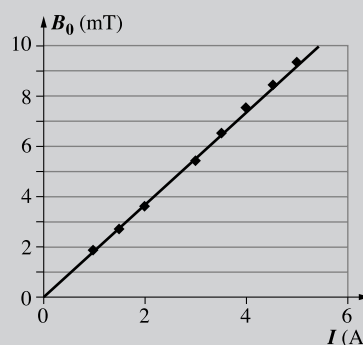
24. 1. Dans l'entrefer de l'aimant en U, le champ est uniforme et il le reste avec la pièce de cuivre. Il n'est plus uniforme en présence de la pièce de monnaie.

2. Certains métaux peuvent perturber un champ magnétique comme l'indique le texte.

3. Non, car le cuivre ne perturbe pas le champ magnétique.

4. L'acier perturberait le champ que doit détecter l'aiguille de la boussole.

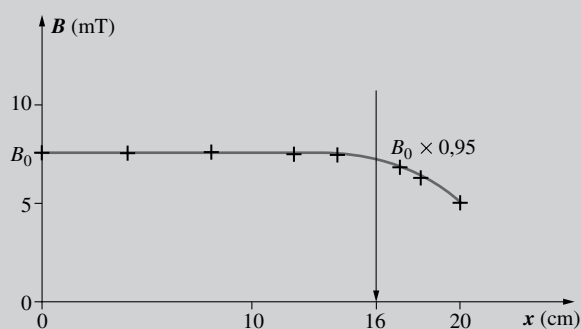
25. I. 1. Le graphique montre que B_0 est proportionnel à I .



$$2. B_0 = 1,9 \times 10^{-3} \times I \text{ avec } B_0 \text{ en T et } I \text{ en A}.$$

$$3. B_0 = 4,7 \times 10^{-3} \text{ T pour } I = 2,5 \text{ A}.$$

II. 1. Graphe de l'évolution de B en fonction de x :



2. $B_0 = 7,55 \text{ mT}$ et $0,95 B_0 = 7,2 \text{ mT}$ pour $x = 16 \text{ cm}$. Donc pour $-16 \text{ cm} < x < 16 \text{ cm}$, le champ est constant à 5 %.

26. 1. Pour une intensité donnée du courant, on déplace la sonde à différents points de l'intérieur du solénoïde et on compare les valeurs du champ magnétique en ces différents points.

2. On règle l'intensité du courant en déplaçant le curseur du rhéostat.

I. 1. Le courant rentre dans le solénoïde par sa borne droite. La borne (A) de l'ampèremètre est vers la borne + du générateur.

$$2. I = \frac{E}{R_h + r};$$

$$R_h + r = \frac{E}{I} = \frac{24}{3,0} = 8,0 \Omega \text{ et } R_h = 4,7 \Omega.$$

II. 1. Voir le document 18, page 203.

2. Le réglage du teslamètre permet de s'affranchir du champ magnétique terrestre.

3. On obtient des droites passant par l'origine, donc la relation qui lie B et I est de la forme : $B_0 = k \cdot I$.

4. Pour le solénoïde à 400 spires $\cdot \text{m}^{-1}$:

$$k_{400} = \frac{0,5 \times 10^{-3}}{1,0} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1}.$$

Pour le solénoïde à 1 000 spires $\cdot \text{m}^{-1}$:

$$k_{1000} = \frac{2,5 \times 10^{-3}}{2,0} = 1,25 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1}.$$

5. $\frac{k_{1000}}{k_{400}} = \frac{12,5}{5} = 2,5$, or $\frac{1\,000}{400} = 2,5$ donc k est proportionnel à n .

6. $B_0 = \mu_0 I \cdot n = k \cdot I$;

$$\mu_0 = \frac{k}{n} = \frac{5,0 \times 10^{-4}}{400} = 1,25 \times 10^{-6} \text{ SI}.$$

Remarque : la valeur théorique :

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ SI} = 1,26 \times 10^{-6} \text{ SI}.$$

Exercices complémentaires

Énoncés

1. Addition de champ magnétique

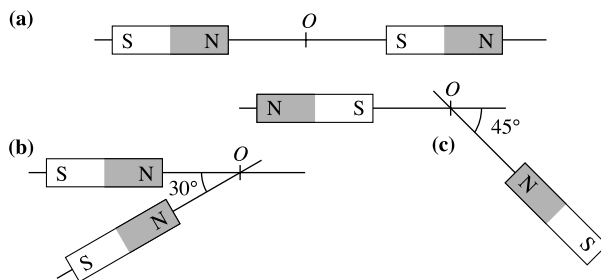
Un teslamètre mesurant la valeur du champ au point O situé à $d = 10 \text{ cm}$ du centre d'un aimant droit, sur l'axe ($x'x$) indique un champ $B(0)$ de valeur 30 mT .



1. Peut-on négliger le champ magnétique terrestre devant celui de l'aimant ?

2. Représenter le champ $\vec{B}$ en O créé par l'aimant droit.

3. Représenter le vecteur champ magnétique résultant et les champs créés par chaque aimant en O dans les différents cas de figure (a), (b) et (c). Tous les aimants sont identiques et le point O est à égale distance $d = 10 \text{ cm}$ du centre de chaque aimant.



2. Spectres magnétiques

On a tracé le spectre magnétique d'un aimant droit et d'un aimant en U.

1. Reproduire ces deux spectres.

2. Étude de l'aimant droit.

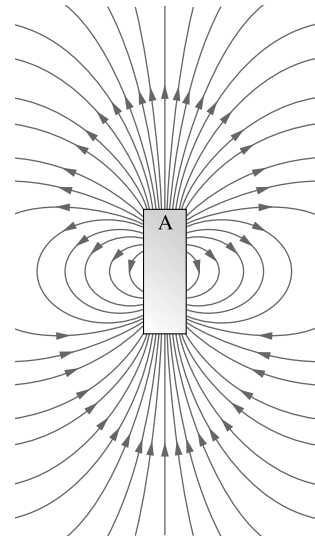
a. Qu'appelle-t-on ligne de champ ?

b. Quels sont le pôle Nord et le pôle Sud de l'aimant ?

c. Placer en différents points autour de l'aimant, des aiguilles aimantées (représentées par une flèche orientée S/N).

d. Dans quelles zones le champ magnétique est-il le plus intense ?

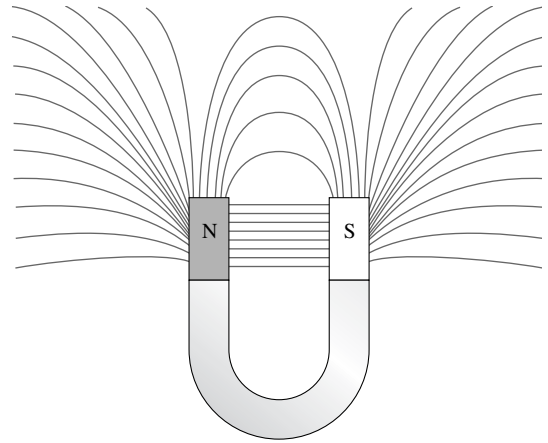
Justifier la réponse.



3. Étude de l'aimant en U.

a. Orienter les lignes de champ.

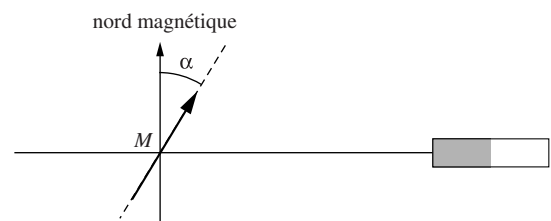
b. Dans quelle zone le champ magnétique est-il uniforme ?



3. Superposition du champ d'un aimant et du champ magnétique terrestre

À l'aide d'une boussole, on a repéré la direction du champ magnétique terrestre en un lieu donné. On approche un aimant droit de la boussole à environ 30 cm .

Il crée en M un champ dirigé perpendiculairement au méridien magnétique et horizontal. L'aiguille de la boussole tourne d'un angle α de 63° .



1. Pourquoi l'orientation de l'aiguille de la boussole est-elle modifiée ? Quel est le pôle Sud de l'aimant ?

2. Calculer la valeur du champ magnétique créé par l'aimant en M . La valeur de la composante horizontale du champ terrestre est de $22 \mu\text{T}$.

Corrigés

1. 1. Le champ magnétique terrestre est de l'ordre de $50 \mu\text{T}$; on peut donc le négliger devant le champ magnétique de l'aimant.

2. La direction du champ magnétique en O et O' est la même, selon $(x'x)$.

3. Cas (a) : Les champs en O sont de même sens ($S \rightarrow N$) : la valeur du champ résultant est égale à 60 mT.

Cas (b) : Le champ est dirigé selon la bissectrice extérieure de l'angle de 30° : $B = 58$ mT.

Cas (c) : Le champ $\vec{B}$ est dirigé selon la bissectrice extérieure de l'angle de 45° : $B = 55$ mT.

2. 2. a. En chaque point d'une ligne de champ $\vec{B}$, le champ est tangent à la ligne de champ, orienté dans le sens d'orientation de la ligne de champ.

b. Le pôle Nord est le pôle A : les lignes de champ sortent du pôle Nord pour atteindre le pôle Sud.

c. L'aiguille prend la direction du champ $\vec{B}$, tangent en chaque point de la ligne de champ et dirigé selon le sens d'orientation de la ligne.

d. Là où les lignes de champ se resserrent, le champ est plus intense. Le champ est donc intense près des pôles.

3. a. Les lignes de champ sortent du pôle Nord pour atteindre le pôle Sud.

b. Entre les deux branches les lignes de champ sont parallèles : le champ est uniforme dans cette région ; le vecteur $\vec{B}$ est un vecteur constant.

3. 1. L'aiguille de la boussole est une aiguille aimantée, elle est sensible au champ magnétique régnant là où elle est placée.

En approchant l'aimant, celui-ci crée un champ magnétique qui se superpose au champ terrestre ; l'aiguille prend la direction du champ résultant.

Le pôle Sud de l'aimant est celui de gauche : le pôle Nord de l'aiguille est attiré.

2. $\tan \alpha = \frac{B_a}{B_h}$; $B_a = 43 \mu\text{T}$.

Compléments scientifiques

1. Origine du géomagnétisme

Le champ magnétique terrestre est la superposition de deux champs :

- le champ dipolaire (représente environ 90 % du champ total) ;
- le champ non dipolaire.

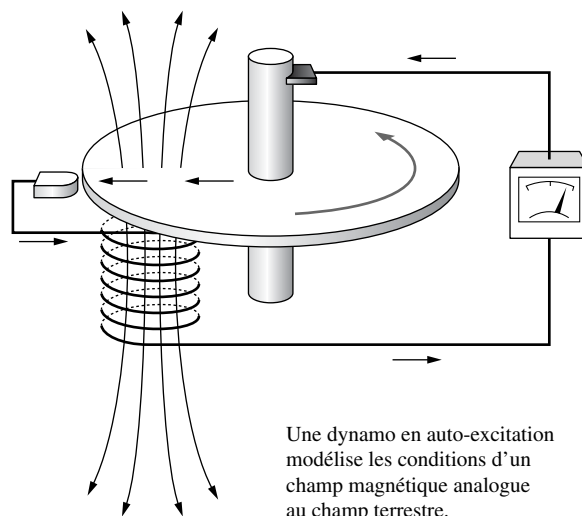
Le champ dipolaire

Le fait qu'une partie du champ géomagnétique change rapidement est un indice important de son origine. L'explication la plus simple et la plus plausible de l'existence du champ est que la Terre est un aimant permanent, analogue à un barreau aimanté dont l'axe serait incliné de 11° par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

Mais si des parties solides du globe devaient se mettre en mouvement de façon à produire des changements aussi rapides du champ géomagnétique, la planète serait déjà désintégrée depuis longtemps. Par conséquent, le champ doit prendre naissance dans une partie de la Terre où un mouvement rapide peut avoir lieu sans perturbation violente, c'est-à-dire dans le noyau externe fluide.

La Terre est composée de quatre couches : le noyau, une graine solide, autour duquel il existe un noyau externe liquide à haute température (entre 2 000 et 4 000 °C) situé entre 2 900 et 5 100 km de profondeur, le manteau et enfin la croûte qui forme la surface terrestre. On sait aussi que les mouvements de convection thermique dans un champ magnétique des particules chargées, qui se trouvent dans le noyau externe, génèrent des courants électriques et que ces courants électriques produisent un champ magnétique.

Donc, la seule explication du champ magnétique est qu'il résulte, en quelque sorte, de mouvements dans le fer du noyau externe, avec un effet comparable à celui d'une dynamo en auto-excitation. En s'exprimant, par analogie, en termes d'électromécanique, on peut aisément le comprendre.



Pour faire démarrer le processus il suffit d'appliquer un champ magnétique initial pendant un court moment. Si un conducteur est en mouvement dans un champ magnétique, un courant est induit ; ainsi, le champ magnétique initial induira un courant dans le disque en rotation. Ce courant parcourra le circuit et traversera en particulier le solénoïde. Mais un courant circulant dans un fil conducteur produit un champ magnétique et, ainsi, le courant généré produira un champ magnétique dans le solénoïde qui générera alors un autre courant dans le disque et ainsi de suite. L'appareil produira ainsi un champ magnétique à l'infini. Mais cette machine n'est pas à mouvement perpétuel, car il faut toujours de l'énergie pour maintenir le disque en rotation.

En fait, une version légèrement plus complexe de ce système, remplaçant les disques par des cylindres, a effectivement fonctionné à l'université de Newcastle, en Angleterre.

Voyons ce qui se passe dans la Terre : le fer du noyau externe est l'équivalent du matériel conducteur du disque, et la source d'énergie maintenant le conducteur en mouvement vient sans doute de la désintégration d'isotopes radioactifs.

Le champ magnétique initial mettant en branle le processus pourrait être un champ égaré provenant du Soleil ou être causé par le faible champ magnétique qui existe dans notre galaxie.

Le champ non dipolaire

La composition géologique du sol, propre à chaque lieu, a une influence sur le champ magnétique. En effet, des roches magnétiques situées à faible profondeur dans la Terre créent un champ magnétique, on peut alors observer des anomalies locales du champ.

Au voisinage de points frappés par la foudre, la roche a été aimantée par le champ magnétique intense produit par le courant électrique correspondant au coup de foudre (son intensité se compte en dizaines de milliers d'ampères), et les anomalies peuvent être énormes, mais sur des surfaces limitées.

Les variations du champ géomagnétique induisent dans le sol, légèrement conducteur, des courants électriques par effet de peau. Ces nappes de courant créent un champ magnétique en surface : le champ tellurique.

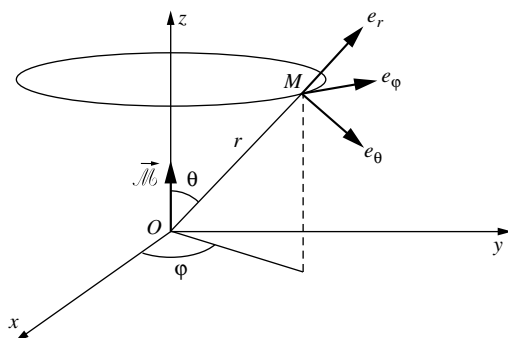
Les anomalies locales et le champ tellurique forment un champ non dipolaire, irrégulier et en moyenne plus faible que le champ dipolaire.

Modélisation du champ dipolaire

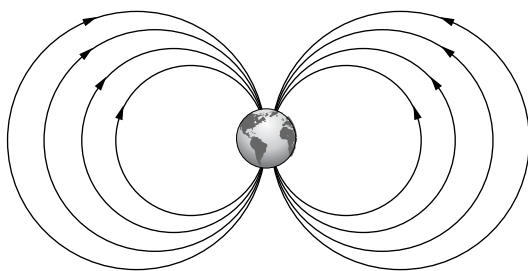
On se place en coordonnées sphériques (r, θ, φ) de repère associé $(e_r, e_\theta, e_\varphi)$:

$$B_r = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M \cdot \cos \theta}{r^3};$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M \cdot \sin \theta}{r^3}.$$



On peut ainsi représenter le champ magnétique dipolaire de la Terre.



La magnétosphère

Le vent solaire est un flux rapide et permanent (plus de 400 km/s) de particules chargées s'échappant du Soleil dans toutes les directions (essentiellement des protons, des électrons et des noyaux d'hélium avec des traces infimes d'ions d'éléments plus lourds, tels que l'oxygène ou le carbone).

Ce vent solaire, en frappant la Terre, confine son champ magnétique dans une zone appelée magnétosphère, déformation ovoïdale du champ dipolaire, puis s'écoule le long de l'onde de choc.

La magnétopause est la limite externe de la magnétosphère où la pression cinétique exercée par les particules du vent solaire est en équilibre avec la pression du champ géomagnétique.

Le plasma est un gaz ionisé : un gaz qui comprend non seulement des atomes ou des molécules neutres, mais aussi des ions et des électrons libres. Il est très bon conducteur et reste globalement neutre. Ces constituants interagissent avec les champs électrique et magnétique.

2. Effets du Soleil sur le champ magnétique terrestre

Les ceintures de radiation (ou de Van Allen)

Au contact de la magnétosphère, les particules chargées de grande énergie provenant du vent solaire sont piégées par le champ magnétique dans des régions en forme d'anneau entourant la Terre, appelées ceintures de radiation ou ceintures de Van Allen.

Il existe deux ceintures de radiation : une ceinture interne chargée positivement et une ceinture externe chargée négativement, plus éloignée de la Terre. Ces ceintures protègent la Terre des rayonnements de particules de haute énergie, donc des orages magnétiques.

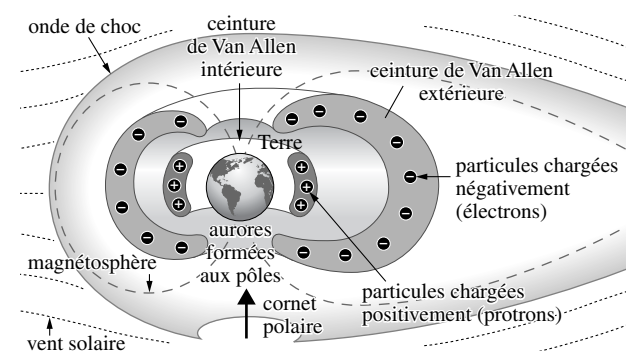


Schéma des ceintures de Van Allen.

Les orages magnétiques

Le Soleil est le siège d'éruptions qui éjectent une très grande quantité d'ions à grande vitesse. Cette activité est cyclique avec un maximum en fréquence et en force tous les 11 ans, le prochain sera en 2011.

Certaines de ces éruptions frappent la Terre et peuvent parfois traverser les ceintures de radiation, on parle alors d'orages magnétiques. Ces orages ont des effets nocifs pour l'Homme et l'électronique, particulièrement dans l'espace à cause de l'absence de l'atmosphère terrestre : ils dégradent les composants des satellites en particulier les semiconducteurs et les instruments d'optique (le satellite américain de communication Telstar 401 fut ainsi rendu inopérant).

Ils créent de fortes radiations qui sont une menace pour les astronautes.

En générant des variations dans le champ magnétique de la Terre, ils créent dans les réseaux câblés des courants induits parfois très intenses, ce qui peut nuire aux installations, (saturation des transformateurs électriques au Canada les 13 et 14 mars 1989 à cause d'un violent orage magnétique). Par le même phénomène, ils

induisent des charges électrostatiques dans les protections cathodiques contre la corrosion des pipelines.

L'Homme a maintenant les moyens de prévoir les orages magnétiques par l'observation du Soleil ; il prend des mesures de protection (arrêt de certains appareils sensibles, déconnexions des liens formant le réseau électrique...).

Les aurores polaires

L'ionosphère est une région de la haute atmosphère terrestre essentiellement composée d'ions, mais également d'atomes d'oxygène et d'azote. Les électrons du vent solaire qui atteignent la haute atmosphère terrestre percutent les atomes de l'ionosphère. Le choc produit alors une excitation des atomes d'oxygène et d'azote. Puis, lors de leur désexcitation, ils émettent une radiation lumineuse. La longueur d'onde de la radiation (donc la couleur de l'émission lumineuse dans le visible) dépend de l'énergie fournie par l'électron et du type d'atome mis en cause dans le choc.

On peut ainsi observer des aurores essentiellement aux pôles du fait des ceintures de Van Allen, et l'on parle d'aurores boréales au pôle Nord et d'aurores australes au pôle Sud.

3. Mesures du champ magnétique

La mesure expérimentale simple du champ magnétique terrestre s'appuie sur les déterminations suivantes :

- période des oscillations d'un aimant, caractérisé par son moment dipolaire ;
- angle de déviation de l'aiguille de la boussole quand on ajoute au champ magnétique terrestre le champ créé par l'aimant dirigé perpendiculairement à l'axe Nord-Sud magnétique (première position de Gauss).

M : moment dipolaire (N . m)

B_H : composante horizontale du champ géomagnétique

m : masse de l'aimant (0, 163 kg)

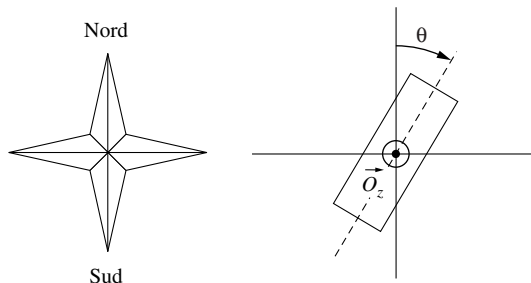
a, b, c : dimensions de l'aimant ($10 \times 2 \times 1$ cm)

$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

r : distance de l'aimant à la boussole (73 cm)

α : angle de déviation (10°)

T : période moyenne d'une oscillation (5,9 s)



On applique le théorème du moment cinétique à l'aimant :

$$\theta + \frac{M \cdot B_H}{J} \cdot \sin \theta = 0.$$

Comme θ est petit, on a $\sin \theta \approx \theta$, ce qui donne l'équation différentielle :

$$\theta + \frac{M \cdot B_H}{J} \cdot \theta = 0.$$

$$\omega = \sqrt{\frac{M \cdot B_H}{J}} \text{ et } T = \frac{2 \pi}{\omega} \Rightarrow M \cdot B_H = J \cdot \left(\frac{2 \pi}{T} \right)^2.$$

$$\text{De plus, } \frac{B_H}{M} = \frac{\mu_0}{2 \pi \cdot \tan \alpha \cdot r^3}; \text{ d'où :}$$

$$B_H = \frac{\sqrt{2 \pi \cdot J \cdot \mu_0}}{T \times \sqrt{\tan \alpha \cdot r^3}}.$$

$$J = \frac{m}{12} \cdot (a^2 + b^2)$$

Numériquement, on obtient : $B_H = 2,16 \times 10^{-5} \text{ T}$.

Les différents appareils de mesures d'un champ magnétique

- Inductomètre.
- Inclinomètre à bobine tournante.
- Sonde à saturation ou fluxgate.
- Magnétomètre atomique.
- Magnétomètre à protons (utilise la résonance magnétique nucléaire : la fréquence de résonance des protons est proportionnelle au champ appliqué).

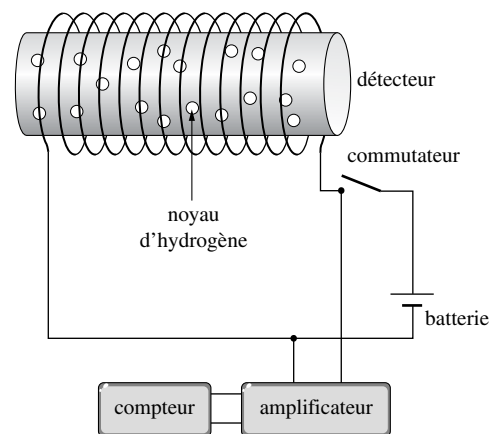


Schéma du magnétomètre à protons.

- Magnétomètre à pompage optique.
- Variomètre : sonde à induction (si on fait varier un champ magnétique à travers une bobine, celui-ci crée une tension électrique aux bornes de la bobine).

En mesurant cette tension avec un voltmètre, on en déduit la variation du champ magnétique. C'est le principe des magnétomètres à induction.

Les mesures du champ magnétique terrestre se faisaient auparavant au sol. Mais depuis le développement de l'aviation, les mesures se font à bord d'avions, ce qui permet d'avoir une continuité des lignes de champ et supprime les anomalies très localisées. Les changements d'altitude n'entraînent qu'une très faible diminution de la valeur du champ magnétique.

4. Les variations du champ magnétique

L'étude des variations se fait à l'aide d'un magnétogramme.

Les variations rapides (pulsatoire, d'amplitude faible) sont celles du champ non dipolaire, elles sont causées par des événements tels que des orages magnétiques...

Les variations lentes et continues sont celles du champ dipolaire. Les pôles magnétiques se déplacent au cours

du temps; ils étaient inversés il y a 700 000 ans (on parle de variations séculaires).

Le champ géomagnétique a une influence sur :

- la Terre (aurores polaires, ceintures de radiation la protégeant du vent solaire...);
- les êtres vivants : certains animaux l'utilisent comme outil de guidage (pigeons, baleines...);
- sur les activités humaines (outil de navigation, archéologie, prospection pétrolière, perturbation des appareils technologiques...).

5. Le champ magnétique dans L'Univers

Le champ magnétique du Soleil

Le champ magnétique solaire est beaucoup plus complexe que celui de la Terre. Il varie énormément. Globalement, il existe un champ magnétique de type dipolaire, mais sa polarité (position des pôles Nord et Sud) s'inverse tous les onze ans. À ce champ dipolaire, se superposent d'autres champs magnétiques, des formes variables, beaucoup plus intenses, mais localisés en des régions assez restreintes du Soleil. Ces champs magnétiques locaux sont observables pendant quelques jours ou quelques semaines. Ils sont associés à d'autres phénomènes, en particulier aux taches solaires.

Le champ magnétique d'origine solaire ne diminue pas très vite à mesure que l'on s'éloigne. Au niveau de l'orbite Terrestre (mais hors de la zone d'influence de la Terre, c'est-à-dire hors de la magnétosphère), on est capable de mesurer le champ magnétique d'origine solaire. Ces mesures sont faites à bord de sondes spatiales.

Le champ magnétique des planètes

D'autres planètes que la Terre ont un champ magnétique. Mercure et Vénus n'ont pas de champ magnétique.

Mars n'a pas de champ magnétique global. La sonde Mars Global Surveyor a mesuré un champ magnétique rémanent dans certains sols, témoin d'un champ magnétique intense dans le passé lointain de la planète. Ce champ aurait existé avant que l'activité volcanique ne modifie la topographie de l'hémisphère Nord de la planète, c'est-à-dire il y a plus de 3,9 milliards d'années. (Lire l'article de H. RÈME dans *La Recherche*, n° 323, septembre 1999).

Le champ magnétique le plus fort est celui de Jupiter. Le champ magnétique de Jupiter est plus complexe que celui de la Terre. On n'en a pas encore un modèle très précis, mais beaucoup de données ont été accumulées dans les dernières années, en particulier grâce à la sonde Galiléo qui est en orbite autour de Jupiter.

Saturne a un champ magnétique, son amplitude est comparable à celui de la Terre.

Uranus a un champ magnétique assez curieux, car son axe de symétrie est très incliné par rapport à l'axe de rotation de la planète (60°, contre 11° pour la Terre).

Neptune a un champ magnétique dont l'axe de symétrie ne passe pas par le centre de la planète, ce qui est aussi singulier...

La Lune n'a pas de champ magnétique. On pensait récemment qu'aucun satellite de planète n'avait de

champ magnétique. Pourtant, on a découvert en 1997 que le satellite de Jupiter Ganymède en a un. Un autre satellite de Jupiter, Io, en a peut-être un. Ces découvertes ont été faites grâce à la sonde Galileo.

Le champ magnétique des étoiles

Comme le Soleil, d'autres étoiles ont un champ magnétique. Pour les astronomes, le Soleil est une étoile de type spectral G, c'est une étoile de taille assez moyenne, de température de surface d'environ 6 000 K, âgée de 5 milliards d'années, et qui devrait continuer à « brûler » encore pendant la même durée.

Il est probable que dans son passé, le Soleil ait eu un champ magnétique beaucoup plus intense qu'aujourd'hui.

Parmi les étoiles dont le champ magnétique est élevé, on rencontre beaucoup d'étoiles jeunes, très chaudes, de type spectral B, par exemple.

On observe des champs magnétiques intenses associés à des étoiles éruptives (éruptions en rayons X et en rayonnement radio).

Il est aussi possible d'observer des champs magnétiques d'étoiles doubles. Par exemple, une étoile géante produisant des champs magnétiques très forts est associée à une étoile analogue au Soleil (type G), ayant un champ magnétique dipolaire. On suspecte que de tels systèmes seraient capables d'engendrer des rayonnements X très intenses (10 000 fois plus forts que dans le cas du Soleil).

Des naines blanches (ce sont des étoiles vieilles, très denses, très petites et froides; elles ne brûlent plus de combustible nucléaire) peuvent avoir un champ magnétique important. Une naine blanche peut aussi faire partie d'un système double. Alors, les interactions entre le champ magnétique de la naine blanche et sa compagne peuvent engendrer des émissions radio importantes. C'est peut être le cas de *AE Aquarius*, une naine blanche associée à une étoile de type spectral K.

Une autre famille d'étoiles à champ magnétique intense est celle des pulsars. Ce sont des étoiles à neutrons, vieilles, très petites (10 à 20 km) et très denses (même masse que le Soleil). Elles tournent sur elles-mêmes en quelques secondes, voire une fraction de seconde (le Soleil tourne sur lui-même en 27 jours). Les pulsars ont un champ magnétique très intense.

Le champ magnétique des galaxies

Il existe des champs magnétiques à l'échelle des galaxies. Ces champs magnétiques galactiques sont peut être à l'origine de l'accélération des rayons cosmiques.

On a découvert récemment que les champs magnétiques jouent un rôle très important dans les galaxies de type spirale barrée.

Les magnétars : les champs magnétiques les plus forts de l'Univers

Le 27 août 1998, une éruption extrêmement intense de rayonnements gammas a été observée en provenance d'une étoile située à 20 000 années lumières (« SGR1900 + 14 » dans la constellation de l'Aigle). Malgré la distance de l'étoile, le niveau de rayonnement perçu est du même ordre que celui reçu du Soleil.

Cette étoile appartient à une famille d'étoiles nouvellement découverte : les magnétars.

Les magnétars seraient des étoiles de masse supérieure à celle du Soleil, d'une taille de quelques kilomètres seulement (comme les étoiles à neutrons), recouvertes d'une surface rigide. Elles sont la source des champs magnétiques les plus forts connus à ce jour dans l'univers. Elles émettent continuellement des rayons X ponctués d'éclairs de radiations gamma et produisent occasionnellement par sursauts des gammas extrêmement intenses comme celui observé en août 1998.

Tout cela serait créé par le champ extrêmement intense de l'étoile qui serait capable de chauffer, de déchirer, et de réduire en miettes la surface rigide de l'étoile.

Les mesures faites sur cette étoile montrent que son champ magnétique est 8×10^{11} ... fois plus fort que celui de la Terre, et 100 fois plus fort que les champs que l'on a mesurés jusqu'à présent dans l'univers.

Cette étoile était déjà sous surveillance, car elle émettait régulièrement des rayons gammas « mous » à intervalles réguliers (5,6 secondes) avant le sursaut du mois d'août 1998.

Depuis son explosion, l'étoile a cessé ces émissions régulières, pour passer au régime plus chaotique (rayons X et éclairs gamma irréguliers) mentionné ci-dessus.

(Source : Donald SAVAGE, Headquarters, Washington DC et Tim TYSON, Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL, Release : 98-172, avril 1999.)

6. Propriétés du champ magnétique

Distribution volumique de courants permanents

Soit D une distribution de courants volumiques $\vec{j}(P)$ d'extension finie.

Le champ magnétique créé par D en un point M de l'espace est donné par la loi de BIOT et SAVART :

$$\vec{B}(M) = \iiint_D \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{j}(P) \wedge \vec{PM}}{PM^3} d\tau_P.$$

μ_0 , appelée perméabilité magnétique du vide, vaut :

$$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ SI exactement ;}$$

cette valeur a été choisie par convention, d'après la définition légale de l'ampère.

Noter que $\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0}$.

On remarque la présence d'un produit vectoriel dans l'expression de $\vec{B}$.

Il est à l'origine du caractère axial de $\vec{B}$.

L'expression de $\vec{B}(M)$ donnée ci-dessus correspond à un champ magnétique statique.

Champ créé par un circuit filiforme

Soit un circuit filiforme C parcouru par un courant permanent I . L'expression du champ qu'il crée en un point M n'appartenant pas à C est :

$$\vec{B}(M) = \oint_C \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell}_P \wedge \vec{PM}}{PM^3}.$$

Charge ponctuelle en mouvement

Une particule de charge q en mouvement ne constitue pas un courant permanent.

L'expression du champ magnétique créé par une telle particule est *a priori* très complexe mais, si la vitesse v de la particule est très faible devant celle de la lumière et si elle n'est pas accélérée, le champ $\vec{B}$ engendré est donné par :

$$\vec{B}(M, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \wedge \vec{PM}}{PM^3}.$$

P est le point où elle se trouve à l'instant t . Mais $\vec{B}(M, t)$ n'est pas statique.

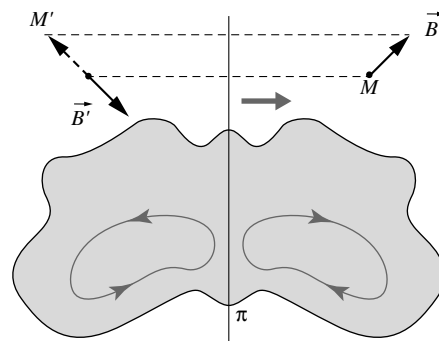
Propriétés de symétrie de $\vec{B}$

D'après le principe de Curie, la symétrie des effets (les forces) est au moins égale à la symétrie des causes. Mais l'expression de la force de Lorentz s'exerçant sur une particule de charge q animée d'une vitesse $\vec{v}$ implique, pour $\vec{B}$, à cause de la présence du produit vectoriel, des propriétés de symétrie plus complexes que celles de $\vec{E}$.

- Le champ magnétique $\vec{B}$ a les propriétés de symétrie d'un pseudo-vecteur.

D'autre part il possède certaines propriétés liées à la distribution des courants.

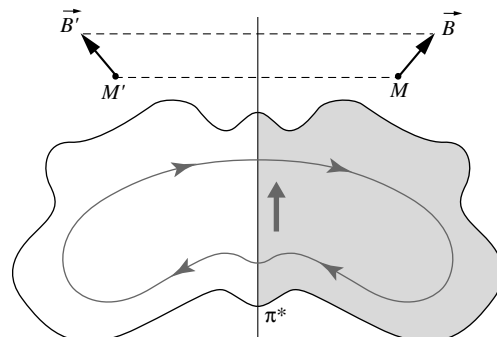
- Symétrie plane : π est un plan de symétrie pour la distribution $\vec{j}(M)$.



(a) Le champ magnétique $\vec{B}$ est perpendiculaire à un plan miroir π en chacun de ses points.

(b) Au point M' symétrique d'un point M , par rapport à un plan miroir π , le champ magnétique $\vec{B}'$ est l'opposé du symétrique vectoriel du champ $\vec{B}$ en M par rapport à ce plan.

- Antisymétrie plane : π est un plan d'antisymétrie pour $\vec{j}(M)$.



(a) Le champ magnétique $\vec{B}$ est contenu dans un plan antimiroir π^* .

(b) Au point M' symétrique d'un point M , par rapport à un plan antimiroir π^* le champ magnétique $\vec{B}$ est le symétrique vectoriel du champ $\vec{B}$ en M .

- Les lignes de champ de $\vec{B}$ se referment sur elles-mêmes, elles ne se coupent pas.

Propriétés du champ $\vec{B}$

1. Conservation du flux

Forme locale $\text{div } \vec{B} = 0$

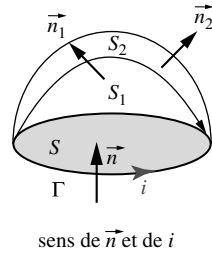
Forme intégrale :

$$\iint_{S_1(\Gamma)} \vec{B} \cdot \vec{n} \, dS = \iint_{S_2(\Gamma)} \vec{B} \cdot \vec{n} \, dS$$

Équation de continuité :

$$B_{N_1} = B_{N_2}$$

Le flux du champ magnétique est à flux conservatif.



sens de $\vec{n}$ et de i

2. Théorème d'AMPÈRE

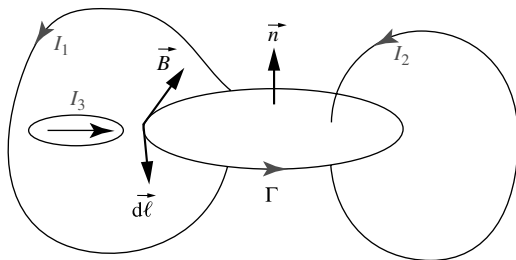
Forme locale : $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$

Forme intégrale : $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \oint_{S(\Gamma)} \vec{j} \cdot \vec{n} \, dS$

Équation de continuité : $\vec{B}_{T_2} - \vec{B}_{T_1} = \mu_0 \vec{j}_s \wedge \vec{n}_{12}$, $\vec{j}_s$ étant la densité surfacique du courant.

Théorème d'Ampère :

La circulation de $\vec{B}$ sur un contour P est égale à la somme des courants enlacés par P comptés algébriquement et multipliés par μ_0 .



Quelques exemples de champs magnétiques

- Fil infini : $\vec{B} = \mu_0 \frac{1}{2\pi r} \vec{e}_\theta$.
- Spire de rayon R en un point M de son axe duquel on la voit sous un angle 2α :

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{I}{2r} \sin^3 \alpha \vec{u}; \vec{u} \text{ est un vecteur unitaire parallèle à l'axe de la spire et orienté par le sens de } I.$$

l'axe de la spire et orienté par le sens de I .

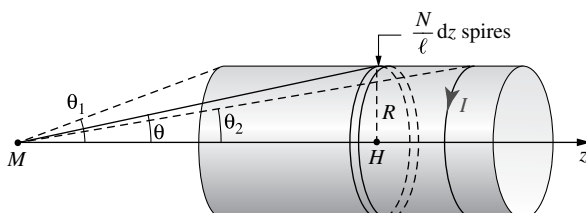
- Solénoïde infini possédant n spires par mètre, à l'intérieur de lui-même :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot n \cdot I \vec{u},$$

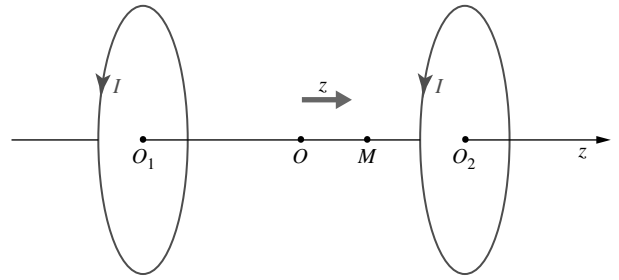
où $\vec{u}$ est un vecteur unitaire parallèle à l'axe du solénoïde et de sens imposé par celui de I .

- Solénoïde de dimension L , comportant N spires. En un point de l'axe :

$$\vec{B} = (\mu_0 \cdot N I / L) [\cos \theta_2 - \cos \theta_1] \vec{u}; \theta_1 \text{ et } \theta_2 \text{ sont les demi-angles sous lesquels on voit les faces du solénoïde.}$$



> Bobines de HELMHOLTZ



Rayon des bobines R ; nombre de spires de chaque bobine N ; distance $O_1 O_2 = 2a$.

$$\text{Avec } B_0 = \mu_0 \frac{NI}{2R}$$

$$\vec{B}(M) = B_0 \left[\frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a+z}{R}\right)^2\right)^{3/2}} + \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a-z}{R}\right)^2\right)^{3/2}} \right] \cdot \vec{u}_z.$$

$$\text{Posons } x = \frac{z}{R} \text{ et } y = \frac{a}{R}.$$

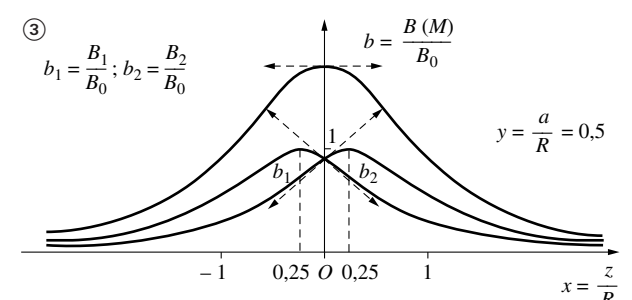
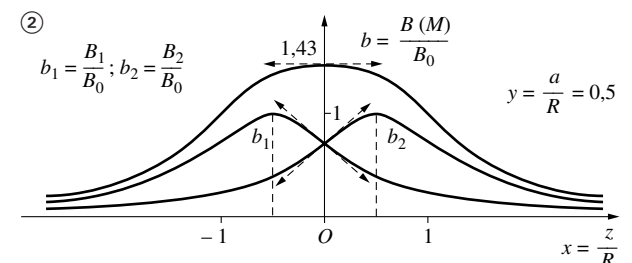
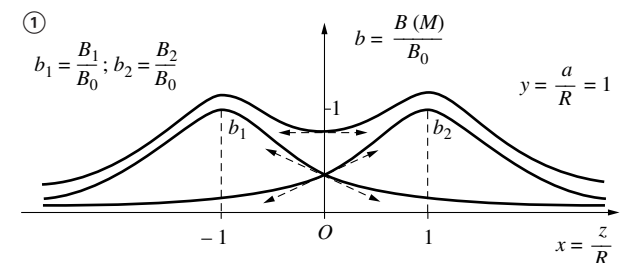
$$\frac{\vec{B}(M)}{B_0} = \frac{1}{(1 + (x+y)^2)^{3/2}} + \frac{1}{(1 + (x-y)^2)^{3/2}} = F(x, y).$$

On montre que pour $y = \frac{1}{2}$ (soit $2a = R$) :

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 F}{\partial x^3} = 0 \text{ en } x = 0.$$

La courbe représentant $F(x)$ pour $y = \frac{1}{2}$ présente un méplat en $x = 0$ (fig. ②).

Dans ces conditions (distance entre les bobines égale à leur rayon), le champ est pratiquement uniforme entre les bobines de Helmholtz.



Revues

- Émile THELLIER, *Pour la Science*, « Géomagnétisme », 1983.
- Michel PETIT, *Pour la Science*, « Magnétosphères », 1983.
- *La Recherche*, « Météo spatiale : course aux prévisions », n° 320.

Ouvrages

- D. MAURAS, *Électromagnétisme 2^e année*, Puf.
- SARMANT et GIÉ, *Électromagnétisme*, Tec et Doc.

Sites internet

• Union des Physiciens

<http://www.physique.u-strasbg.fr/~udp/articles/astro/magnet.htm>

• Introduction à la physique spatiale

<http://www.cetp.ipsl.fr/lgdpub/21phspa/concepts/magnetique/magnetique.html>

• L'environnement des planètes

<http://www.cetp.ipsl.fr/lgdpub/21phspa/planetes/planetes.html>

• Observatoire du Canada

http://www.geolab.nrcan.gc.ca/geomag/f_magdec.html
http://www.sciences-en-ligne.com/Frames_dictionary.asp
http://geomag.usgs.gov/frames/mag_charts.htm
<http://www.encyclopedie-hachette.com/>

• Quelques notions de géomagnétisme dans d'autres sites

<http://rubble.phys.ualberta.ca/~doug/G221/MagLecs/maghist.html> (histoire du magnétisme)

<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/potfld/faqgeom.shtml>
(en Anglais : FAQ, questions fréquentes)

<http://www.tulane.edu/~sanelson/geol111/pltect.htm>
(en Anglais : très bonne introduction aux applications en Tectonique)

<http://www.ifg.tu-clausthal.de/java/mag2/mag2d-d.html>
(en Anglais : Applet Java pour le calcul d'anomalies)

<http://www.physique.u-strasbg.fr/~udp/articles/astro/magnet.htm>

• Champ magnétique

<http://www.cetp.ipsl.fr/lgdpub/21phspa/concepts/magnetique/magnetique.html>

• ØERSTED

<http://www.spof.gsfc.nasa.gov/Education/whmfield.html>
<http://www.univ-mulhouse.fr/~illfurth/oersted/oersted.htm>

• AMPÈRE

<http://csbf.qc.ca/LaSamare/cours/ethibault/Physique/textes/Ampere.htm>

• Travaux pratiques

<http://physique.scola.ac-paris.fr/centre/word6/Tp18.doc>
http://www.dt.insu.cnrs.fr/garchy/gene_champ.html

Forces électromagnétiques

chapitre 11 physique

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

III. Électrodynamique

B. Magnétisme, forces électromagnétiques

3. Forces électromagnétiques

4. Couplage électromagnétique

Contenu

- Loi de LAPLACE ; direction, sens, valeur de la force : $F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin \alpha$.
- Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. Rôle moteur des forces de LAPLACE.
- Observation de l'effet réciproque associé au mouvement d'un circuit dans un champ magnétique : conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.

Connaissances et savoir-faire exigibles

On attend qu'un élève sache :

- appliquer la loi de LAPLACE pour évaluer la force qui s'exerce sur une portion rectiligne de circuit ;
- sur un schéma de principe donné, représenter la force de LAPLACE qui explicite le fonctionnement d'un haut-parleur électrodynamique, d'un moteur à courant continu ;
- connaître les ordres de grandeur de la puissance des moteurs électriques usuels.

Exemples d'activités

- Utiliser la loi de LAPLACE pour interpréter qualitativement des expériences telles que :
 - la barre mobile sur des rails ;
 - l'action entre courants parallèles ;
 - le mouvement d'une bobine au voisinage d'un aimant.
- Mettre en évidence le principe de fonctionnement d'un haut-parleur électrodynamique, d'un moteur à courant continu.
- Observer le fonctionnement en microphone d'un haut-parleur électrodynamique.

Commentaires

Forces électromagnétiques

Aucune expression vectorielle de la force de LAPLACE n'est demandée. On dégagera les paramètres utiles et leur rôle : direction de la force, sens dépendant de ceux du courant I et du champ magnétique $\vec{B}$, proportionnalité à I et à B , influence de l'angle entre le champ magnétique et le conducteur.

Couplage électromécanique

L'objectif est de montrer le rôle considérable qu'ont les forces électromagnétiques par la possibilité de convertir quasi intégralement, l'énergie électrique en énergie mécanique (potentielle, cinétique) et réciproquement. De plus, elles sont à l'origine de nombreux systèmes électromécaniques, actionneurs et transducteurs. Ce rôle sera illustré par l'analyse des forces de LAPLACE sur un circuit simple, par exemple un cadre rectangulaire pour présenter le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu. Le calcul du travail des forces de LAPLACE sera éventuellement effectué sur l'exemple du rail, ce qui permet de réinvestir la notion de travail vue en mécanique. L'étude générale de leur travail ainsi que la notion de flux magnétique sont hors programme. On s'intéressera au rendement global de cette conversion d'énergie sur un système expérimental bien choisi.

L'apparition d'une f.é.m. et éventuellement d'un courant dans un circuit se déplaçant dans un champ magnétique fixe est un exemple de phénomène d'induction ; un exemple différent a été introduit en classe de Troisième, la rotation d'un aimant devant une bobine fixe (cas de la « dynamo » de bicyclette). L'étude de ces phénomènes d'induction, y compris de celui d'auto-induction, n'est pas au programme de la classe de Première ; on se limite ici à une simple observation du phénomène pour montrer la réciprocité du couplage.

Matériel

Cours

> Activité 1

Matériel de l'expérience des rails de LAPLACE.

> Activité 2

Une bobine plate suspendue à une potence, un aimant droit, un générateur.

➤ Activité 3

- Un haut-parleur (boomer), des morceaux de polystyrène.
- Un haut-parleur démonté.

➤ Expérience du document 11

Une bobine suspendue à un ressort, un générateur, un oscilloscope.

Déroulement du chapitre

➤ Objectifs

- Appliquer la loi de LAPLACE.
- Comprendre le fonctionnement d'un haut-parleur et celui d'un moteur.

Activités préparatoires

A. Deux savants fondateurs de l'électromagnétisme

Cette activité fait découvrir une partie des travaux de deux savants fondateurs de l'électromagnétisme : AMPÈRE et FARADAY.

AMPÈRE mit en évidence l'interaction entre deux courants et FARADAY découvrit le phénomène d'induction électromagnétique.

Réponses aux questions

1. Dispositif expérimental qui permettrait de mettre en évidence les conclusions d'AMPÈRE : deux fils verticaux, placés proches l'un de l'autre et parcourus par des courants de même sens ou de sens contraires.
2. Un alternateur fonctionne sur le principe décrit par FARADAY.

B. Voiture hybride, voiture économique

Dans un proche avenir, ce type de véhicule à propulsion hybride va se développer.

Réponses aux questions

1. Le moteur électrique permet d'économiser du carburant, car il peut suppléer le moteur à essence. En descente ou au freinage, il est possible de recharger « gratuitement » la batterie.
2. Un moteur électrique ne dégage pas de gaz d'échappement et est silencieux.

Cours

Dans ce chapitre, nous mettons en évidence la force de LAPLACE, nous donnons le principe du moteur électrique ainsi que celui des alternateurs.

1. Quelles sont les caractéristiques des actions électromagnétiques ?

Ces caractéristiques sont découvertes à partir d'une expérience simple : celle des rails de LAPLACE.

Nous indiquons comme règles d'orientations :

- la règle du bonhomme d'AMPÈRE ;
- la règle des trois doigts de la main droite.

➤ Activité 1

Réponses aux questions

1. Lorsqu'on établit le courant, la tige se déplace.
2. Le sens de déplacement dépend :
 - a. du sens du courant ;
 - b. du sens du champ magnétique.

2. Quel est le principe de fonctionnement d'un haut-parleur ?

2.1 Action d'un aimant sur une bobine parcourue par un courant

Cette expérience est nécessaire pour la compréhension du principe de fonctionnement d'un haut-parleur : l'action d'un aimant.

➤ Activité 2

Réponses aux questions

1. En l'absence de courant, il ne se passe rien.
2. et 3. Lorsqu'on établit le courant, la bobine est attirée ou repoussée : cela dépend du sens du courant.

2.2 Principe de fonctionnement d'un haut-parleur

Il est nécessaire de démonter un haut-parleur afin de connaître ses parties essentielles : bobine et aimant.

Brancher d'abord une pile aux bornes du haut-parleur, puis un générateur très basse fréquence afin d'observer le mouvement de la membrane.

➤ Activité 3

Réponses aux questions

1. Le mouvement de la membrane dépend du sens du courant.
2. Lorsque le haut-parleur est alimenté par une tension alternative, la membrane vibre à la fréquence du courant.

Difficulté : On connaît l'expression de la force de LAPLACE qui s'exerce sur une portion rectiligne de fil placée dans un champ uniforme. Comment calculer la force qui s'exerce sur tout le fil (circulaire) de la bobine placée dans un champ non uniforme (mais de valeur constante en tout point de la bobine) ?

On calcule la force élémentaire qui s'exerce sur une portion rectiligne élémentaire, puis on fait la somme vectorielle de toutes ces forces. Comme toutes ces forces ont la même direction et le même sens, il suffit de calculer une somme scalaire. Dans chaque terme de la somme, le produit $I \cdot B$ est constant : on peut alors le mettre en facteur commun. La somme des portions élémentaires est égale à la longueur L du fil. La force a donc pour valeur $I \cdot B \cdot L$.

3. Comment fonctionne un moteur électrique à courant continu ?

Il est nécessaire de démonter un tel moteur. La difficulté réside dans la compréhension de la commutation : à chaque demi-tour il est nécessaire d'inverser le sens du courant puisque le sens du champ magnétique change. Cela est le rôle du système balais-collecteur.

Du point de vue énergétique, on insistera sur la conversion énergie électrique-énergie mécanique (comme pour l'expérience des rails de LAPLACE).

4. Comment produire du courant électrique ?

L'expérience décrite met en évidence le phénomène d'induction électromagnétique : apparition d'un courant dans une bobine mobile qui se déplace dans un champ magnétique. On insistera sur l'importance de ce phénomène : production du courant alternatif dans les centrales E.D.F par les alternateurs.

Rechercher et expérimenter

1. Ce qu'il est bon de savoir avant d'acheter des enceintes acoustiques

Réponses aux questions

- Les transformations d'énergie effectuées par un haut-parleur, sont :
 - au niveau de la bobine : transformation d'énergie électrique en énergie mécanique ;
 - au niveau de la membrane : transformation d'énergie mécanique en énergie sonore (autre forme de l'énergie mécanique).
 L'effet Joule est le principal responsable des pertes d'énergie.
- Il ne faut pas brancher un haut-parleur à un amplificateur lorsque l'impédance du haut-parleur est plus faible que celle de l'amplificateur, car le courant débité serait trop important pour l'amplificateur (destruction de certains composants électroniques).
- L'intérêt de monter plusieurs haut-parleurs pour constituer une enceinte est :
 - d'adapter l'impédance des haut-parleurs à celle de l'amplificateur ;
 - d'obtenir une meilleure restitution sonore (graves, aigus, etc.).
- Le rendement du haut-parleur dont les caractéristiques sont données dans le *document 2* est égal à $\frac{4}{120}$, soit 3,3 % seulement.
- On peut associer deux haut-parleurs en série sans risque de détruire l'amplificateur.

2. Comment fonctionne un haut-parleur ?

Dans ce T.P., on mesure une force électromagnétique par « compensation ».

Réponses aux questions

- Lorsque la bobine est parcourue par un courant et qu'elle est ramenée dans sa position initiale, deux autres forces s'exercent sur le système : la force de LAPLACE et la force due au poids de la masse marquée.
- Lorsqu'on ramène l'index à sa position initiale, les deux nouvelles forces se compensent d'après le principe de l'inertie.
- La relation entre F et I est une fonction linéaire : F et I sont proportionnelles.

Aborder les difficultés du chapitre

Cette fiche est une fiche méthode permettant de déterminer les caractéristiques (point d'application direction, sens, valeur) d'une force électromécanique. Elle reprend les mêmes règles d'orientation que celles du cours.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. La force de LAPLACE est parallèle aux rails, dirigée vers la droite du schéma.
2. $F = B \cdot I \cdot a$; $F = 1,0 \times 10^{-2}$ N.
3. $W = F \cdot L$; $W = 4 \times 10^{-4}$ J.
1. $F_1 = B_2 \cdot I \cdot AB$ et $F_2 = B_1 \cdot I \cdot CD$.
2. Ces forces sont dans le plan du schéma, perpendiculaires aux fils, appliquées aux milieux des portions de fil considérées et attractives.
3. Les forces changent de sens, elles deviennent répulsives.
1. La force est dans le plan du disque, perpendiculaire à OA , dirigée vers la gauche.
2. a. La force n'est pas parallèle à l'axe du disque et ne le rencontre pas. Le disque tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.
b. On change le sens de la force, donc celui de la rotation du disque.
3. $F = B \cdot I \cdot a$; $F = 2,1 \times 10^{-3}$ N.

Exercices

- Une portion CD d'un conducteur, parcourue par un courant d'intensité I et située dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, est soumise à une force $\vec{F}$, dite de LAPLACE :
 - de point d'application, le milieu de CD ;
 - de direction perpendiculaire à CD et à $\vec{B}$;
 - de sens donné par le bonhomme d'AMPÈRE ;
 - de valeur $B \cdot CD \cdot I \cdot \sin \alpha$.
- a. La force a une valeur maximale si la portion de conducteur est perpendiculaire au champ.
b. Elle est nulle si la portion est colinéaire au champ.
1. La force est dirigée vers l'avant du plan.
2. a. et b. La force change de sens.
c. La force est inchangée.
3. $F = B \cdot I \cdot PM \cdot \sin \alpha$.
 $F(N)$, $B(T)$, $I(A)$, $PM(m)$
- a. La force est dirigée vers la gauche.
b. La force est nulle.
c. La force est dirigée vers la droite.
d. La force est dirigée vers l'avant.
1. Voir le cours.

- 2.** Si le courant est alternatif, la force change périodiquement de sens, à la même fréquence que le courant.
- 6. 1. a.** Alternateur, microphone.
b. Moteur, haut-parleur.
- 2.** Le phénomène d'induction électromagnétique.
- 7. 1.** Le champ magnétique est horizontal, dirigé du pôle Nord de l'aimant vers le pôle Sud.
2. La force est verticale, dirigée vers le bas, appliquée au milieu de CD et de valeur $4,9 \times 10^{-4}$ N.
- 8. 1.** La tige se déplace, car elle est soumise à la force de LAPLACE.
2. La force de LAPLACE, appliquée à la tige, est parallèle aux rails, dirigée vers la droite du schéma. La tige se déplace dans cette direction.
3. $F = B \cdot I \cdot a$; $F = 0,10$ N.
4. $W = F \cdot d$; $W = 5,0 \times 10^{-3}$ J.
5. La tige se déplace dans l'autre sens.
- 9. 2.** Si les courants sont de même sens, les champs sont de sens contraires et les forces, perpendiculaires et dans le plan des fils, sont attractives.
 Si les conducteurs sont parcourus par des courants de même intensité, chaque portion de longueur L de fil est soumise à la force $F = 2 \times 10^{-7} \cdot \frac{I^2}{d} \cdot L$.
3. Si $I = 1$ A, $d = L = 1$ m, alors $F = 2 \times 10^{-7}$ N.
4. On ne précise pas si la force est attractive ou répulsive.
- 10. 1.** Le champ n'est pas uniforme, car les lignes de champ ne sont pas parallèles.
2. Ces forces sont parallèles, et perpendiculaires au plan de la spire; elles sont dirigées vers l'arrière du schéma, de valeur $B \cdot I \cdot \Delta \ell$.
3. et 4. La force est suivant l'axe de la bobine, dirigée vers l'arrière, de valeur $B \cdot I \cdot \ell$ (ℓ longueur totale du fil).
5. La force change de sens en même temps que le courant. On observe donc des oscillations de la bobine.
- 11. 1.** Voir le cours (doc. 9, p. 220).
2. et 3. Les deux forces qui s'exercent sur les deux brins sont perpendiculaires au cadre, de sens contraire et tendent à le faire tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.
4. a. Le brin $Q'P'$ a pris la place de QP . Le courant d'intensité I circule de P' vers Q' dans le brin $P'Q'$ et circule de Q vers P dans le brin QP . Le champ magnétique est dirigé vers le centre du cadre pour le brin $Q'P'$ et vers l'extérieur du cadre pour le brin QP . Les forces n'ont pas changé; elles assurent la rotation du cadre, toujours dans le même sens.
b. Le courant ne changerait pas de sens lorsque le cadre traverserait le plan neutre et le cadre se mettrait à tourner en sens inverse; il n'y aurait pas de rotation continue.
c. Les balais permettent d'alimenter le cadre en courant.

- 12. 1.** Le sens du champ magnétique change périodiquement dans la bobine.
2. Il y a conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.
3. Ceci est le principe de l'alternateur : production du courant alternatif dans les centrales E.D.F.
- 13. 1.** Pôle Nord en dessous du schéma.
2. a. Le courant va de M vers N ; initialement $I = 20$ A (par la suite lorsque la barre se déplace, I diminue, car une f.é.m induite apparaît).
b. La force de LAPLACE est située dans la plan des rails, perpendiculaire à MN et dirigée vers la gauche. Elle a pour valeur $F = B \cdot I \cdot a = 8 \times 10^{-2}$ N.
3. a. Le ressort est à droite de la barre.
b. Remarque : dans l'énoncé, on doit donner $k = 4$ N $\cdot$ m $^{-1}$ et non $k = 0,5$ N $\cdot$ m $^{-1}$.

$$B = \frac{k \cdot \Delta \ell}{I \cdot a}.$$
- 14. 1.** La force est appliquée au milieu de OM , dirigée vers la gauche.
2. Le champ magnétique est dirigé vers l'avant du plan de la roue.
3. La roue va tourner plus vite.
4. On doit inverser le courant ou le champ.
- 15. 1. et 2.** Voir le cours.
3. $\eta = \frac{m \cdot g \cdot h}{W_c} = 84 \%$.
- 16. 1.** Le poids est vertical, appliqué en G , milieu de AB .
 Si la tige est en lévitation, donc en équilibre, la force de LAPLACE $\vec{F}$ est opposée au poids : $\vec{F}$ est **verticale, dirigée vers le haut**.
 Le champ magnétique est tel que le bonhomme d'AMPERE couché sur le fil, le courant entrant par ses pieds et voyant fuir $\vec{B}$, voit $\vec{F}$ dirigée vers sa gauche. Sur la figure, ce bonhomme est donc vu de dos, pieds vers A et tête vers B .
 $\vec{B}$ est perpendiculaire au plan de la feuille dirigée vers l'arrière.
2. $F = I \cdot d \cdot B \cdot \sin \alpha$; le champ étant perpendiculaire au courant.
 $\alpha = 90^\circ$ et $\sin \alpha = 1$; d'où : $F = I \cdot d \cdot B$;
 $\vec{F}$ étant opposée à $\vec{P}$, $F = P = m \cdot g$; on a donc l'égalité :

$$I \cdot d \cdot B = m \cdot g \text{ et } I = \frac{m \cdot g}{d \cdot B}.$$
- Numériquement, $I = 10$ A.
- 3.** La valeur B du champ magnétique étant proportionnelle à l'intensité I du courant dans le solénoïde, si on double I , on double B .
 F étant proportionnelle à B , si B double alors F double.
- 17.** Ordre : D.; B.; C.; A.
- 18. 1.** Cette valeur correspond au poids du cadre.
2. Le champ magnétique horizontal est dirigé vers l'arrière.

3. a. Le cadre est soumis à son poids $\vec{P}$, à la tension du ressort et à la force de LAPLACE $\vec{F}$.

En valeur : $F = T - P$.

b.

$I(\text{A})$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$T(\text{N})$	0,63	0,68	0,70	0,75	0,78	0,83
$F(\text{N})$	0	0,05	0,07	0,12	0,15	0,20

c. Fonction linéaire (le premier point après l'origine est nettement hors de la droite); F et I sont proportionnelles.

d. $F = 0,4 \cdot I$.

19. 1. La force de LAPLACE, dirigée vers le bas, est appliquée entre le balais et l'axe de rotation. La roue tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.

2. Les courants doivent être de même sens.

3. a. $\mathcal{P}_e = U \cdot I = 2,55 \text{ kW}$.

b. $\eta = 86 \%$.

c. $E = 159 \text{ V}$.

d. $\mathcal{P}_m = 2,35 \text{ kW}$.

La différence correspond aux pertes internes (pertes magnétiques et frottements mécaniques).

20. 1. La face 3 est Nord. Il y a répulsion entre une face et un pôle de même nom et attraction entre une face et un pôle de noms différents.

2. Face 1 : Sud ; face 2 : Nord ; face 3 : Sud.

3. Le moteur ne tournerait pas.

21. 1. Bobine du haut : face Sud en bas ; bobine du bas : face Nord en haut ; bobine centrale : face Sud en haut.

Le sens de rotation correspond au sens indiqué en rouge.

2. Rotor : bobine centrale ; stator : les deux autres bobines.

3. Au bout d'un demi-tour, les noms des faces de la bobine centrale ont changé.

4. On change le sens de rotation.

5. Le moteur peut fonctionner en courant alternatif, car le rotor et le stator sont montés en série.

22. 1. $F = 1,8 \text{ N}$.

2. $W = 2\pi \cdot R \cdot F = 1,0 \text{ J}$.

3. Le moteur effectue 30 tours par seconde.

$\mathcal{P} = 30 \times 700 \times 1,0 = 2100 \text{ W} = 2,1 \text{ kW}$.

23. I. 1. Le moteur ne peut fonctionner seul sans pédalage : il ne peut fournir que 50 % au plus de la puissance totale à développer et ne fonctionne plus si la vitesse dépasse $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

2. Oui, la partie jaune ne dépasse jamais la partie verte.

3. L'aide au pédalage intervient surtout au démarrage et en montée et si la vitesse est inférieure à $24 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

II. 1. La batterie fournit l'énergie électrique au moteur.

2. a. Voir le cours.

b. Les forces électromagnétiques (de LAPLACE) sont à l'origine de la rotation du moteur.

3. a. $v = 2,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. $\mathcal{P} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v$; $\mathcal{P} = 0,11 \text{ kW}$. Cette puissance est minimale, car il faut compenser en plus la puissance des forces de frottement.

c. La puissance minimale est environ de 55 W . En réalité, il y a des frottements et la puissance à fournir est plus importante.

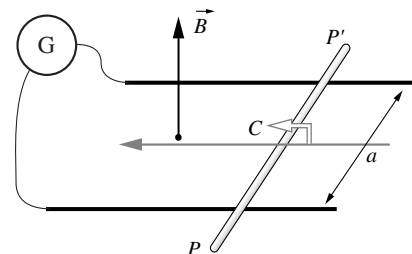
d. Oui, car $55 \text{ W} < 250 \text{ W}$.

Exercices d'évaluation

Énoncés

1. Expérience des rails de LAPLACE

Une barre de cuivre PP' , de longueur $L = 6 \text{ cm}$, est posée perpendiculairement sur deux rails horizontaux parallèles, conducteurs, distants de $a = 4,0 \text{ cm}$, reliés aux bornes d'un générateur G délivrant une intensité $I = 10 \text{ A}$.



Le circuit est placé dans un champ uniforme $\vec{B}$, de valeur 20 mT , dont la direction est perpendiculaire au plan des rails.

1. Préciser sur un schéma le sens du courant pour que la barre glisse vers G .

2. a. Représenter la force électromagnétique qui s'exerce sur la barre et exprimer sa valeur.

b. Calculer cette valeur et la comparer au poids de la barre de masse 25 g .

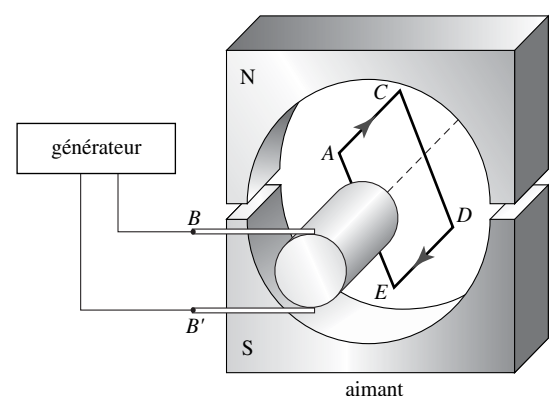
La barre peut-elle facilement glisser?

3. Calculer le travail de cette force lorsque la barre s'est déplacée de $d = 4,0 \text{ cm}$.

2. Principe d'un moteur à courant continu

On a schématisé ci-après les parties principales d'un moteur à courant continu.

Le champ magnétique créé par l'aimant est radial.



1. Représenter le champ $\vec{B}$ s'exerçant sur les brins AC et ED ainsi que les forces électromagnétiques s'exerçant sur chaque brin AC et ED .

2. a. Dans quel sens tourne le rotor sous l'action de ces forces (sur le schéma, le courant circule de A vers C)?

b. Lorsque AC passe la ligne neutre, pourquoi faut-il inverser le sens du courant I ?

3. Un moteur à courant continu a une force électromotrice E et une résistance interne r . Il fonctionne sous une tension $U = 24 \text{ V}$. Lorsqu'il est parcouru par un courant $I = 4,0 \text{ A}$, les pertes par effet Joule correspondent à une puissance de 16 W .

a. Écrire le bilan de puissance pour ce moteur.

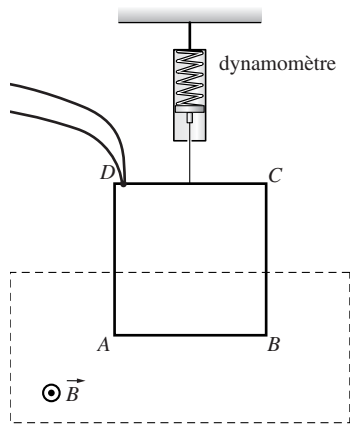
b. Calculer la f.é.m. de ce moteur et la résistance interne r .

c. En fait, il existe d'autres pertes dites pertes internes. En admettant que ces pertes correspondent à une puissance égale à la puissance Joule, calculer la puissance mécanique utile $\mathcal{P}_u$ transmise à l'arbre moteur.

Quel est le rendement de ce moteur?

3. Mesure d'un champ magnétique

Un cadre rectangulaire indéformable $ABCD$ est formé par un conducteur en cuivre enroulé sur un cadre et pouvant être relié à un générateur. L'enroulement comporte 100 spires. Il est suspendu à un dynamomètre. Sa partie horizontale inférieure AB plonge dans une zone où règne un champ magnétique uniforme créé par des bobines d'HELMHOLTZ dans lesquelles circule un courant d'intensité i .



1. Lorsque l'intensité I du courant dans le cadre est nulle, le dynamomètre indique $1,9 \text{ N}$. Que peut-on en déduire?

2. On fait passer à présent un courant d'intensité $I = 10 \text{ A}$. Le dynamomètre indique $2,5 \text{ N}$.

Déterminer la valeur F de la force électromagnétique qui agit sur la portion AB et le sens du courant dans le cadre.

3. Quelle est l'indication du dynamomètre dans les cas suivants :

a. on change le sens du courant dans le cadre;

b. on change le sens du courant dans les bobines d'HELMHOLTZ;

c. on double l'intensité i dans les bobines d'HELMHOLTZ;

d. on double l'intensité I et l'intensité i .

4. Lors d'une expérience, on a relevé les valeurs suivantes :

$I = 15 \text{ A}$; $2,8 \text{ N}$ (valeur indiquée par le dynamomètre); $AB = a = 10 \text{ cm}$.

Déterminer la valeur du champ magnétique.

Corrigés

1. 1. La force électromagnétique doit être dirigée vers le générateur. En appliquant la règle des trois doigts ou de l'observateur d'AMPÈRE, le sens du courant doit être de P' vers P .

2. a. Le champ agit sur la portion de la barre parcourue par un courant, c'est-à-dire sur la distance a . La force s'applique au milieu C du segment compris entre les deux barres.

Le vecteur $\vec{B}$ est perpendiculaire à $P'P$. La valeur de la force est donc :

$$F = a \cdot I \cdot B.$$

$$F = 4 \times 10^{-2} \times 10 \times 20 \times 10^{-3} = 8,0 \times 10^{-3} \text{ N}.$$

b. Calculons le rapport :

$$\frac{F}{P} = \frac{8,0 \times 10^{-3}}{(25 \times 10^{-3} \times 10)} = 3,2 \times 10^{-2}.$$

Cette force est très faible, comparée au poids. Pour que la barre glisse, il faut qu'il y ait très peu de frottement.

3. La force électromagnétique est une force motrice appliquée en C . Lorsque le point C se déplace de 4 cm dans le sens du mouvement, le travail W de la force est :

$$W = F \cdot d = 8,0 \times 10^{-3} \times 4,0 \times 10^{-2} = 3,2 \times 10^{-4}, \text{ soit } W = 3,2 \times 10^{-4} \text{ J}.$$

2. 1. On applique l'une des règles pour déterminer les forces qui s'exercent sur les brins AC et ED .

2. a. Le cadre tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

b. Il faut inverser le sens du courant pour que le cadre tourne toujours dans le même sens.

$$3. \text{ a. } \mathcal{P}_e = U \cdot I = E \cdot I + \mathcal{P}_j = E \cdot I + r \cdot I^2.$$

$$\text{ b. } E \cdot I = U \cdot I - \mathcal{P}_j, \text{ soit } E = 20 \text{ V}; r = \frac{\mathcal{P}_j}{I^2} = 1 \Omega.$$

$$\text{ c. } E \cdot I = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{\text{pertes int.}}; \mathcal{P}_u = 80 - 16 = 64 \text{ W}.$$

Le rendement de ce moteur est défini par : $\eta = \frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_e}$, soit $\eta = 67 \%$.

3. 1. Le dynamomètre mesure le poids du cadre, soit $1,9 \text{ N}$.

2. Dans la partie AB , il apparaît une force électromagnétique $\vec{F}$, verticale, dans le même sens que le poids.

D'après la règle du bonhomme d'AMPÈRE, le courant doit circuler de A vers B .

La valeur de la force $\vec{F}$ est donc de $0,6 \text{ N}$.

3. a. La force change de sens; le dynamomètre va indiquer : $1,9 - 0,6 = 1,3 \text{ N}$.

b. Le sens de $\vec{B}$ va changer, donc le sens de la force électromagnétique aussi; le dynamomètre indiquera : $1,3 \text{ N}$.

c. La valeur du champ $\vec{B}$ est proportionnelle à l'intensité : sa valeur double, donc la force également; le dynamomètre indiquera : $1,9 + 1,2 = 3,1 \text{ N}$.

d. La force est proportionnelle à I et i , donc le dynamomètre indiquera : $1,9 + 2,4 = 4,3 \text{ N}$.

4. La force électromagnétique s'exerce sur chaque brin (100 brins); la force résultante est donnée par la relation :

$$F = N \cdot a \cdot B \cdot I.$$

$$F = 0,9 \text{ N}; B = \frac{0,9}{100 \times 0,1 \times 15} = 6 \times 10^{-3} \text{ T.}$$

La valeur du champ mesuré est de 6 mT.

Bibliographie

Ouvrages

- J.-M. BREBEC, *Électromagnétisme*, H-Prépa, Hachette, 1996.
- *Encyclopédie Universalis*, « Moteurs électriques », « Électroacoustique » (haut-parleur et microphone).

Sites Internet

- **Construire son haut-parleur**
<http://users.chello.be/cr27672/>
- **T.P. sur le haut-parleur**
http://www.ac-toulouse.fr/sc_phy/docum/phy/sec/p2gtp08a.htm
- **Introduction à l'acoustique**
http://www.ircam.fr/equipes/analyse-synthese/tassart/doc/beaux_arts/note-4.fr.html
- **Simulation**
http://home.a-city.de/walter.fendt/physfra/moteur_elec.htm
- **Voiture électrique**
<http://w3.ville-larochelle.fr/lr/V1.html>
- **Moteur électrique**
<http://www.users.imagnet.fr/~benoist1/principe.htm#Home>
- **TGV**
<http://www.sncf.fr/co/materiel/tgv/index.htm>
- **EDF**
<http://www.edf.fr/html/fr/index.html>

- **Des ordres de grandeurs**
<http://www.tops-intl.com/micromot.htm>
- **Le moteur : principe et animation**
http://www.bpchamp.com/part/jvoyenne/le_moteur_electrique.htm
http://www.ifrance.com/Gueux/le_moteur_electrique.htm
<http://www.epsic.ch/pagesperso/schneiderd/Schema/moteurelec.htm>
<http://www.sciences-en-ligne.com/Dictionnaire/DictionnaireDIST/m/mote02.htm>
<http://cmupc2.unige.ch/modelisme/moteur.html#standart> un petit moteur de 1900 http://perso.club-internet.fr/dspt/le_moteur_electrique.htm
- **Moteur pour modélisme**
<http://www.astroflight.com/Brushless.html>
<http://collections.ic.gc.ca/cnphoto/archives/cnational/x32675.html>
- **Locomotives de la SNCF**
<http://www.sncf.com/co/materiel/locos/index.htm>
- **Micro-moteur électrostatique**
<http://www.lesir.ens-cachan.fr/lesir/Poles/CIM/microsystemes/Moteur.htm>
<http://www.cnrs.fr/diffusion/fototheq/vitrines/spi/spi2.html>
<http://Ipmo.univ-fcomte.fr/Ipmo/equipes/Equipe2/mdl/fichemicromoteur.html>
- **Étude d'un micro-moteur**
<http://www.ac-dijon.fr/pedago/physique/Documents/PhysiqueAppliquee/MoteurAsserv/MoteurAsservissement.htm>
- **Principe du moteur**
<http://www.ac-dijon.fr/pedago/physique/Documents/PhysiqueAppliquee/MoteurPasAPas/MoteurPasAPas.htm>

Propagation de la lumière. Visibilité d'un objet

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

IV. Optique

1. Conditions de visibilité d'un objet

Contenus

1. Conditions de visibilité d'un objet

- Rôle de l'œil dans la vision directe des objets.
- Propagation de la lumière : modèle du rayon lumineux ; point-objet.
- Lois de la réflexion.

Connaissances et savoir-faire exigibles

- Savoir que :
 - un objet ne peut être vu que s'il est éclairé ou s'il émet de la lumière ;
 - un objet ne peut être vu que si de la lumière provenant de cet objet arrive dans l'œil.
- Savoir que lors de la vision d'une image à travers un système optique la lumière issue de l'objet pénètre dans l'œil après un parcours non rectiligne et que le cerveau l'interprète comme venant en ligne droite.

Exemples d'activités

- Élaborer une réponse aux questions suivantes :
 - peut-on voir la lumière ?
 - à quelles conditions un objet est-il visible ?
- Observation de l'effet d'une lentille convergente, divergente, sur un faisceau de lumière parallèle.

Commentaires

On insistera sur le fait que l'on ne voit pas la lumière mais seulement des objets, à la condition que ceux-ci envoient de la lumière dans l'œil de l'observateur. Ceci a lieu lorsque l'objet est lui-même émetteur de lumière (cas d'un filament incandescent) ou lorsque l'objet dif-

fuse vers l'œil de l'observateur une partie de la lumière qu'il reçoit. On ne fera pas de distinction fondamentale entre ces deux cas. Par conséquent, on ne parlera pas de sources primaires ou secondaires mais d'objets, qu'ils soient lumineux ou éclairés.

Le professeur veillera à ce que l'expression « rayon lumineux » ne soit pas mal interprétée et ne laisse pas croire aux élèves que l'on peut « voir la lumière ». On notera que la vision humaine est étroitement liée au fonctionnement du cerveau derrière le récepteur qu'est l'œil. L'interprétation des signaux reçus en terme d'image est liée au conditionnement du cerveau à la propagation rectiligne de la lumière.

Matériel

Cours

Dans tout le cours, utilisation de l'appareil de modélisation des rayons lumineux se propageant à travers diverses lentilles.

➤ Activité 1

Une lampe de bureau ou un projecteur de diapositives.

➤ Activité 2

- Un laser.
- Un miroir.
- Une cuve en verre pour visualiser un faisceau laser (fumée lente, poudre de craie, brumisateur).

➤ Activité 3

- Des lentilles à bords minces et à bords épais.
- Une lampe avec condenseur.
- Produits pour visualiser le faisceau.

Rechercher et expérimenter

- Une source de lumière permettant de sélectionner un fin pinceau lumineux ou rayon laser.
- Papier blanc.
- Un petit miroir vertical.
- Une plaque de polystyrène.
- Une lentille convergente sans monture.

Déroulement du chapitre

En premier lieu, Il s'agit ici d'amener les élèves à comprendre :

- qu'on ne voit pas la lumière mais qu'on ne peut voir que des objets;
- que la condition pour qu'un objet soit visible est qu'il envoie de la lumière dans l'œil de l'observateur.

En second lieu, les activités suivantes visent à installer le modèle du rayon lumineux qui traduit la propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène.

Nous avons ensuite choisi d'étudier les modifications du trajet du rayon lumineux lorsqu'il rencontre un miroir ou une lentille. On pourra faire aussi référence à la réfraction étudiée en Seconde.

➤ Objectifs

- Connaître les conditions de visibilité d'un objet.
- Réactiver les concepts de base sur la lumière : propagation rectiligne, modèle du rayon lumineux.
- Décrire les effets de quelques systèmes optiques sur la propagation de la lumière.
- Connaître les caractéristiques d'une lentille convergente.

Activités préparatoires

A. Voir ou ne pas voir ?...

On réinvestit les notions vues en classe de Troisième sur la diffusion de la lumière.

Une ampoule allumée est placée dans la boîte. Demander aux élèves de prévoir ce qu'ils verront dans la boîte lorsqu'on enlèvera le cache.

Les élèves répondent individuellement. On s'attend à ce que la plupart d'entre eux répondent qu'on va voir de la lumière dans la boîte. Lorsque les élèves se sont fait une opinion, le professeur découvre l'orifice de la boîte. Le trou reste noir.

Réponses aux questions

Expérience (a)

1. L'observateur en T_1 ou T_2 ne peut pas voir la lumière; les parois noires de la boîte absorbent la lumière; il n'y a pas diffusion de la lumière.
2. Le papier blanc n'est pas éclairé; il n'y a pas de lumière qui sort des trous.

Expérience (b)

1. L'objet est visible pour l'observateur placé en T_1 , mais invisible par l'observateur devant T_2 .
2. Par le trou T_1 , il sort de la lumière diffusée par l'objet.
3. L'intérieur de la boîte est peint en noir pour éviter la diffusion de la lumière sur les parois de la boîte.

En utilisant une boîte aux parois blanches, l'observateur devant T_2 voit les parois éclairées de la boîte; de la lumière peut sortir du trou T_2 . L'objet est encore mieux éclairé par la lumière diffusée par les parois.

B. La magie de WITELLO

Cette gravure est intéressante, car elle met en jeu toutes les propriétés de la propagation de la lumière; c'est un véritable jeu de piste.

Réponses aux questions

1. Le tableau illustre la propagation rectiligne (lumière issue du Soleil), la réfraction sur les gouttelettes d'eau (formation d'un arc-en-ciel), la réfraction à la traversée de la surface de l'eau (voir la forme des jambes du baigneur), la composition de la lumière (arc-en-ciel), la déviation par une lentille convergente (concentration de la lumière et allumage d'un feu), la réflexion sur le miroir.

2. Les rayons émis par le Soleil devraient être quasi parallèles.

3. Le miroir inverse l'image par rapport à un miroir plan habituel. Ce miroir est courbe. Une petite cuillère quand on la regarde par l'intérieur a le même effet.

4. C'est une « loupe », constituée d'une lentille convergente qui a pour effet de concentrer la lumière et par là-même, l'énergie qu'elle transporte, sur une surface très réduite. Cela peut provoquer un échauffement important jusqu'à l'inflammation de la matière.

Cours

1. Quelles sont les conditions de visibilité ?

1.1 Conditions de visibilité d'un objet

La vue est un de nos sens essentiels. On reprend la boîte noire utilisée dans l'activité préparatoire A pour rappeler les conditions de visibilité d'un objet, déjà évoquées au collège et en classe de Seconde. On montrera, en particulier, que l'on n'observe rien si on ne dispose pas d'une source de lumière.

1.2 La lumière est invisible

Le professeur présente une source laser éteinte. Il la dirige vers un mur de la classe et pose la question suivante : « Lorsque je vais mettre en route le laser que va-t-on voir ? »

On s'attend à ce que les élèves prévoient qu'on observe un pinceau rectiligne de lumière entre la source et le mur.

Conclusion : On ne voit pas la lumière. Seuls des objets peuvent être vus.

➤ Activité 1

Réponses aux questions

1. On ne peut pas distinguer le trajet suivi par la lumière entre la lampe et le bureau.
2. Il semble sur la photographie que l'on voit un faisceau lumineux dans le sous-bois. Cela est dû aux poussières ou aux gouttelettes d'eau.
3. Secouer un chiffon plein de poussière de craie sur la lampe. Le faisceau de lumière est alors visible.

2. Quel est le trajet suivi par la lumière dans un milieu transparent ?

Le principe de la propagation rectiligne ne se démontre pas, on l'affirme : dans un milieu transparent et homogène la lumière se propage suivant une ligne droite. On représente ce phénomène en construisant des droites orientées, appelées rayons lumineux. L'orientation d'un rayon est celle du sens de propagation de la lumière.

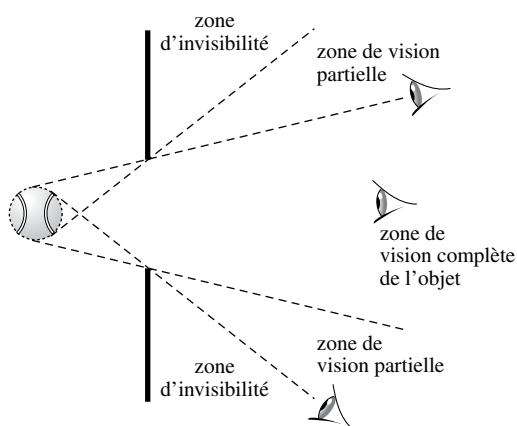
Après l'énoncé du principe de propagation rectiligne, le professeur pourra revenir sur les conditions de visibilité d'un objet ; il pourra alors proposer l'exercice expérimental ci-dessous.

➤ Exercice expérimental

Une balle de tennis est placée derrière un écran percé d'une fenêtre rectangulaire. Où doit-on placer l'œil, devant la fenêtre, pour voir l'objet complètement, partiellement, ou pas du tout ?

Les élèves, travaillant en petits groupes, doivent d'abord prévoir leurs réponses en s'aidant du schéma ci-dessous sur lequel ils doivent déterminer de manière précise les zones de vision complète, partielle ou d'invisibilité de l'objet.

Les élèves sont ensuite invités à vérifier ou à rectifier leurs prévisions en procédant par des visées et en s'aidant d'épingles pour repérer avec précision les limites des zones. La réponse attendue est donnée par le schéma ci-dessous.



Le professeur fait alors remarquer aux élèves, que voir « complètement » l'objet, c'est voir « tous » les points visibles alors que le voir « partiellement » c'est n'en voir qu'une partie. La question de la visibilité d'un objet est donc ramenée à celle de chacun de ses points.

Le professeur propose alors de rendre compte de ces résultats énonçant des conditions de visibilité.

1. On appelle point objet tout point P susceptible d'envoyer de la lumière dans toutes les directions de l'espace. Un objet est un ensemble de points objets.

2. Condition de visibilité d'un point objet : P sera vu directement s'il est possible de construire un rayon PO joignant P à l'œil O de l'observateur sans rencontrer une surface opaque.

3. Qu'arrive-t-il à la lumière quand elle rencontre un milieu opaque ?

Ce chapitre permet de souligner la différence entre réflexion et diffusion à partir d'expériences simples et d'observations de phénomènes de la vie courante. Tout le monde a pu un jour ou l'autre se servir d'un miroir pour éblouir un camarade. Lors d'un tournage d'un film, on utilise de larges panneaux blancs pour éclairer les scènes de tournage.

➤ Activité 2

Réponse à la question

Placer sur la marche du faisceau laser un écran diffusant, perpendiculaire à la surface du miroir plan.

Repérer sur cet écran la perpendiculaire au miroir, ainsi que les faisceaux incident et réfléchi.

4. Qu'arrive-t-il à la lumière lorsqu'elle rencontre un autre milieu transparent ?

Le phénomène de réflexion est souvent associé au phénomène de réfraction, lorsque la lumière rencontre un autre milieu transparent (voir classe de Seconde). On peut renvoyer aux acquis pour illustrer par un exercice simple le phénomène de réfraction.

Mais l'intérêt ici est de montrer que dans une lentille la succession de deux réfractions permet de modifier la marche d'un rayon lumineux

➤ Activité 3

L'activité 3 permet de distinguer les deux types de lentilles convergentes et divergentes.

Réponses aux questions

1. Faisceau convergent pour les lentilles à bords minces et faisceau divergent pour les lentilles à bords épais.
2. La lumière est déviée, car elle progresse dans l'air, pénètre dans le verre en subissant une réfraction, puis ressort dans le verre en subissant une seconde réfraction.

Grâce à un système fixé au tableau ou sur un support magnétique, le professeur peut faire découvrir les propriétés de certains rayons lumineux caractéristiques pénétrant dans une lentille convergente. On définit alors les foyers objet et image, le centre optique.

Ce tracé de rayons particuliers sera utilisé dans le chapitre suivant.

Rechercher et expérimenter

1. Réflexions sur la réflexion

Réponses aux questions

1. Matériaux transparents : air, verre et eau.
2. La partie transmise correspond aux rayons réfractés.
3. La lumière subit non seulement une réfraction mais aussi une réflexion.
4. L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence ; ces deux angles sont repérés par rapport à la normale à la surface réfléchissante.
5. On réalise un schéma en réinvestissant les propriétés de la réfraction revues dans les acquis de Seconde.
6. Si les indices de réfraction des deux milieux de propagation sont différents et si la surface de séparation est lisse, le faisceau parallèle incident donne deux faisceaux parallèles réfléchis et réfractés.

Si le corps n'est pas lisse, la « réflexion » a lieu dans toutes les directions : c'est le phénomène de diffusion. Une autre partie de la lumière est transmise si le milieu est transparent. Si le milieu est opaque, il n'y a plus de transmission : une partie de la lumière est absorbée.

2. Comment un miroir modifie-t-il le trajet de la lumière ?

Réponses aux questions

1. Les faisceaux incident et réfléchi sont mis en évidence par la diffusion de la plaque graduée.

Le miroir provoque le changement de la direction du pinceau lumineux.

2. L'angle d'incidence i est égal à l'angle de réflexion r , comme l'indiquent les auteurs du texte « Comment dévier la lumière? ».

Mise en garde :

Si l'on tente de réaliser la réflexion, sur un miroir plan, d'un pinceau laser visualisé en saupoudrant de la poussière, on observe quatre pinceaux et non pas deux (l'incident et le réfléchi), comme on pourrait le prévoir.

En effet, les pinceaux incident et réfléchi deviennent des objets matériels constitués par les poussières éclairées : ils donnent chacun leur réfléchi dans le miroir. C'est la raison pour laquelle l'œil perçoit quatre pinceaux. Une telle expérience réalisée en premier lieu peut susciter des difficultés de compréhension chez les élèves. Cependant, elle peut être le support d'un exercice de réflexion.

3. Comment une lentille modifie-t-elle le trajet de la lumière?

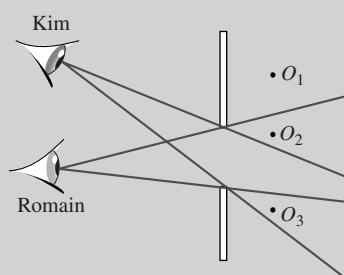
Réponses aux questions

1. Le rayon passant par le centre optique n'est pas dévié.
2. a. Ce point est appelé foyer image.
b. Cette distance est la distance focale de la lentille.
3. Les tracés sont les mêmes. Seule, change la distance OF' .

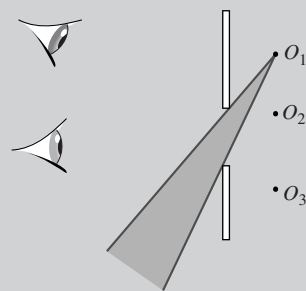
Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. 1. Le photographe ne peut pas voir le faisceau lumineux représenté en jaune.
2. Le papier photographique est éclairé. Il diffuse de la lumière dont une partie est reçue par les yeux du photographe.
3. Lorsque le négatif est noir, il ne laisse pas passer la lumière; le papier n'est pas éclairé. Lorsque le négatif est transparent, le papier est éclairé.
4. Les fines gouttelettes d'eau diffusent la lumière; le faisceau dessiné en jaune peut être alors vu par diffusion de la lumière.
2. 1. On trace les rayons extrêmes s'appuyant sur les bords du trou et pénétrant dans l'œil. Pour être observables, les objets doivent être dans le cône correspondant. Donc Romain voit la diode O_2 et Kim, la diode O_3 .



2. Tracer le faisceau issu de la diode O_1 et s'appuyant sur les bords du trou; l'œil doit se trouver dans ce faisceau pour observer cette diode.



3. 1. et 2. a. Le faisceau parallèle incident est transformé en faisceau convergent qui passe par le foyer image de la lentille convergente.

b. Réflexion sur un miroir d'un faisceau parallèle; le faisceau réfléchi est aussi parallèle.

c. Diffusion de la lumière par une surface; le faisceau incident est un faisceau parallèle alors que la diffusion se fait dans toutes les directions.

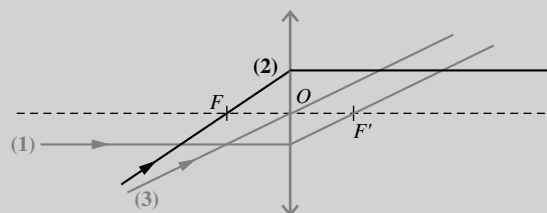
3. a. Un objectif d'appareil photographique pour une lentille convergente, une loupe...

b. Un miroir, la surface de l'eau...

c. Une feuille de papier blanche, un écran de cinéma.

4. Lois de la réflexion : le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence. L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

4. 1. Le rayon (1) émerge en passant par le foyer image F' .



Le rayon (2) passant par le foyer objet F émerge parallèlement à l'axe optique.

Le rayon (3) passant par le centre optique O n'est pas dévié.

2. La distance mesurée est $OF' = 8$ mm. La distance focale est donc de 8 cm.

La vergence de la lentille est donc $C = \frac{1}{f}$.

$$C = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ δ.}$$

La vergence de cette lentille est égale à 12,5 dioptries.

Exercices

1. 1. Un objet est visible s'il est éclairé ou s'il émet de la lumière et si la lumière venant de cet objet arrive à l'œil de l'observateur.

2. La lumière n'est pas visible, seuls les objets éclairés le sont.

2. 1. Dans le vide et dans un milieu transparent et homogène, la lumière se propage en ligne droite.

2. Un rayon lumineux est un modèle géométrique permettant de repérer le trajet suivi par la lumière; on ne peut pas le visualiser. On ne visualise que des faisceaux ou des pinceaux lumineux.

3. Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons lumineux.

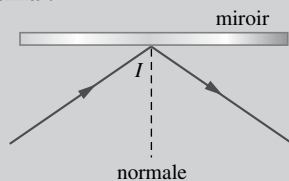
3. 1. Vrai : un corps diffusant renvoie une partie de la lumière qu'il reçoit, c'est donc un objet éclairé.

2. Faux : dans l'obscurité, un objet diffusant ne reçoit pas de lumière et ne peut donc pas la diffuser ; il n'est par conséquent pas visible.

3. Faux : la lumière se propage en ligne droite si le milieu est homogène.

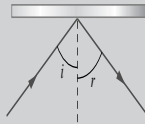
4. Vrai : une telle surface diffuse la lumière.

4. 1. Schéma :



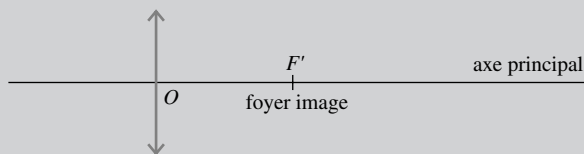
2. Première loi : le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence. Deuxième loi : l'angle de réflexion r est égal à l'angle d'incidence i .

3.



5. 1. Une lentille à bords minces est convergente alors qu'une lentille à bords épais est divergente.

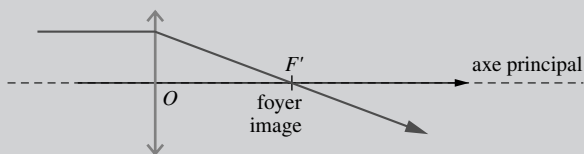
2. Schématisation :



3. Les rayons passant par le centre optique O d'une lentille convergente ne sont pas déviés.

4. Les rayons incidents parallèles à l'axe optique sortent d'une lentille en passant par le foyer image F' .

6.



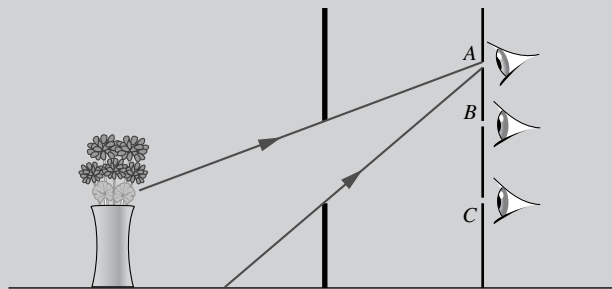
7. Sur la photo (c), Laura voit le texte de son livre, car elle reçoit directement dans les yeux de la lumière provenant des pages éclairées par la lampe de son bureau.

8. 1. On ne peut pas voir la lumière mais seulement les objets éclairés. On perçoit le trajet de la lumière sur cette photographie parce que des objets minuscules sont éclairés : ici, il s'agit de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air.

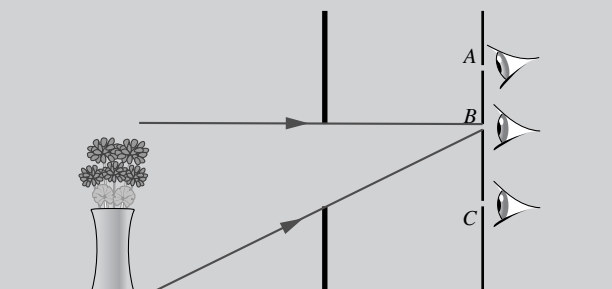
2. On peut simuler cette expérience à l'aide d'une lampe, d'un carton muni de fentes et d'un brumisateur d'eau. Le carton muni de fentes simule les arbres laissant passer une partie de la lumière solaire. On

projette de l'eau à l'aide du brumisateur le long du trajet de la lumière ayant traversé le carton pour simuler l'humidité de l'atmosphère et voir le trajet de la lumière.

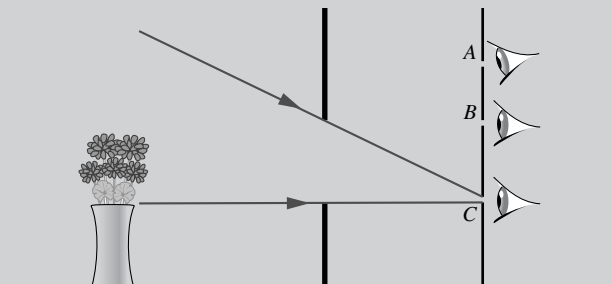
9. 1. Faux : en A , l'œil ne voit que la partie inférieure du vase.



2. Vrai.



3. Faux : en C , l'œil ne voit que les fleurs.

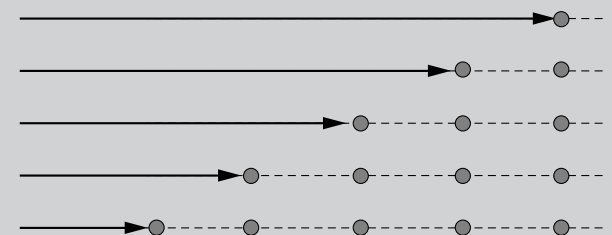


10. Pour aligner des arbres ou des piquets on peut procéder par visée. Avec un faisceau laser, il ne faut surtout pas viser le faisceau laser.

1. Piquer le piquet le plus éloigné, le faisceau laser étant arrêté par le piquet.

Se rapprocher de la source laser et piquer un deuxième piquet qui arrête le faisceau laser et ainsi de suite...

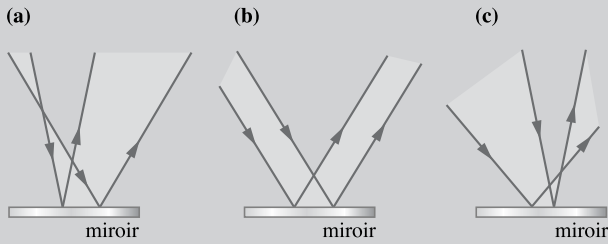
2.



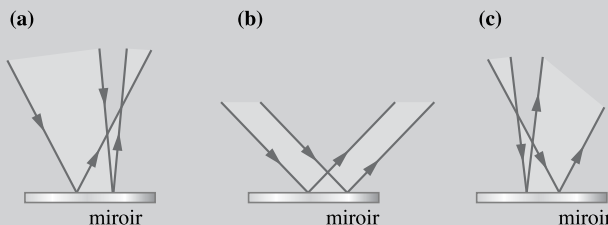
11. 1. Diffusion de la lumière par l'écran de projection.

2. Réflexion.

12. 1.

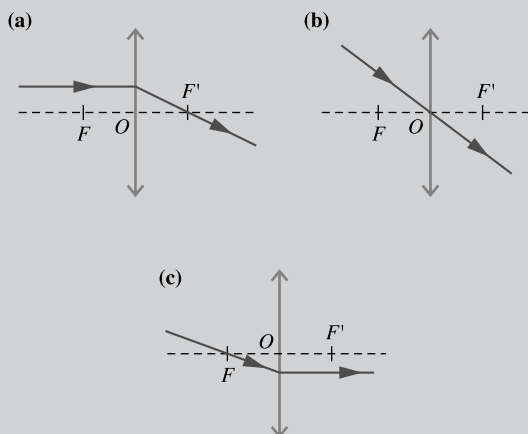


2.



13. Le schéma (b) correspond à une lentille divergente à bords épais.

14. Rayons lumineux traversant une lentille convergente :



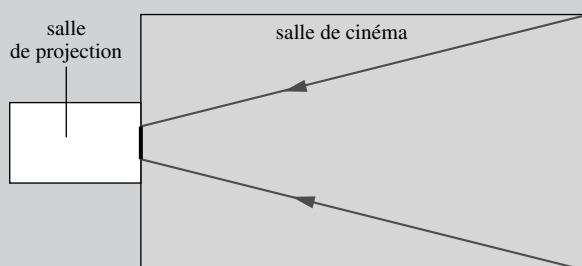
15. 1. $C = \frac{1}{f} = \frac{1}{OF'}$, C en dioptrie (δ) et f' en m.

2. $f' = 12,5$ cm.

16. 1. L'écran permet de diffuser la lumière émise par le projecteur dans toute la salle jusqu'aux yeux des spectateurs. L'écran est blanc afin que toutes les lumières colorées soient renvoyées.

2. Le tissu des murs et des fauteuils est sombre, ce qui permet une meilleure absorption de la lumière et évite ainsi la diffusion de la lumière réémise par l'écran.

3. La zone de visibilité du projectionniste est représentée sur le schéma ci-dessous.



On constate que le projectionniste ne peut pas voir tous les spectateurs assis dans la salle.

17. 1. Les rayons doivent être parallèles et traversent la lentille en étant déviés.

Le faisceau parallèle converge au foyer où se trouve le feu.

2. a. Sur la face bombée, l'image de l'observateur est droite alors qu'en observant la face creuse son image est renversée.

b. L'image est renversée, donc c'est un miroir concave (face creuse réfléchissante).

3. a. La réfraction et la réflexion de la lumière dans chaque goutte d'eau sont à l'origine de l'arc-en-ciel.

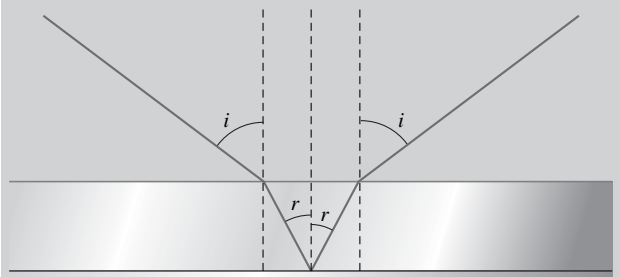
b. La lumière solaire est constituée d'une infinité de radiations colorées (voir le cours de Seconde).

18. 1. a. Le faisceau pénétrant dans le verre subit une réfraction, c'est-à-dire un changement de direction. On peut connaître la déviation en appliquant la loi de DESCARTES : $n_{\text{air}} \cdot \sin i = n_{\text{verre}} \cdot \sin r$,

n_{air} et n_{verre} sont les indices de réfraction.

b. En fait, sur la surface de séparation air-verre, il y a aussi un phénomène de réflexion et un phénomène de diffusion.

2. La marche du rayon lumineux est symétrique par rapport à la normale au miroir.



19. 1. L'angle indiqué n'est pas l'angle d'incidence, car ce dernier se repère par rapport à la normale KN au miroir M_1 .

Cet angle est égal à $90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$.

2. a. Le rayon réfléchi se propage dans le plan d'incidence horizontal (KS , KN).

b. D'après la loi de DESCARTES, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence et vaut 60° .

3. a. Le rayon arrive sur M_2 en L . Le plan d'incidence est le plan horizontal (LK , LN'). Le rayon réfléchi se trouvera dans ce plan.

b. Le triangle KOL étant rectangle en O , l'angle $\widehat{KLO}$ est égal à 60° . L'angle d'incidence sur le miroir M_2 est égal à 30° .

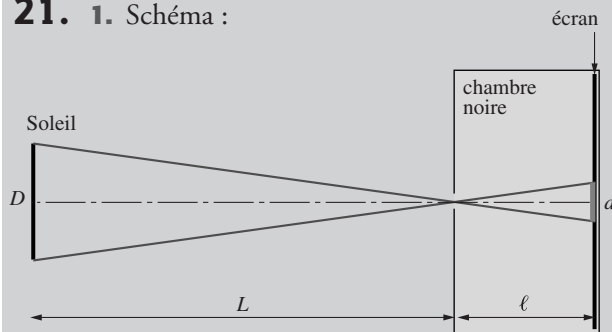
4. Le rayon réfléchi sur le miroir M_2 est parallèle au rayon incident sur M_1 et en sens contraire.

20. 1. Le Soleil est une source de lumière très éloignée : les rayons solaires qui atteignent la Terre sont quasiment parallèles les uns par rapport aux autres.

2. D'après le théorème de THALÈS, $\frac{h}{\ell} = \frac{H}{L}$ donc

$$H = \frac{1,0 \times 5,0}{0,40} = 12,5 \text{ m, soit environ } 13 \text{ m.}$$

21. 1. Schéma :



2. D'après le théorème de THALÈS, $\frac{d}{\ell} = \frac{D}{L}$ donc :

$$D = \frac{1,5 \times 10^8 \times 9 \times 10^{-6}}{1,0 \times 10^{-3}} = 1,35 \times 10^6 \text{ km.}$$

3. a. Diamètre apparent du Soleil vu depuis la Terre :

$$\tan \theta = \frac{1,35 \times 10^6}{1,5 \times 10^8} = 9,0 \times 10^{-3},$$

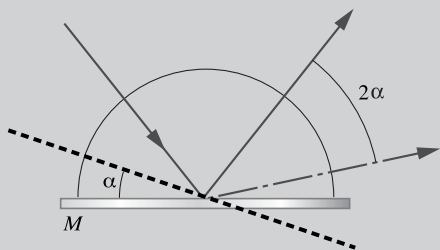
soit : $\tan \theta \approx 9,0 \times 10^{-3} \text{ rad.}$

b. Pour un observateur à 30 cm de l'écran, l'image du Soleil est vu sous un angle :

$$\tan \theta = \frac{9 \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-8}} = 3,0 \times 10^{-2},$$

soit : $\tan \theta \approx 3,0 \times 10^{-2} \text{ rad.}$

22. 1. Le rayon réfléchi est symétrique par rapport à la normale.



2. Le rayon réfléchi tourne d'un angle $2\alpha = 60^\circ$.

3. Lorsqu'on tourne un miroir d'un angle α , le rayon réfléchi tourne d'un angle 2α .

23. C'est une activité expérimentale où l'on vérifie parfaitement le parallélisme des rayons lumineux.

24. 1. Le pouvoir séparateur d'un œil est de l'ordre de 3×10^{-4} à 4×10^{-4} radian.

2. $\tan \theta \approx \theta = \frac{h}{d}$;

$h = d \cdot \theta$; $h \approx 2 \times 10^{-2} \times 3 \times 10^{-4} = 6 \times 10^{-6} \text{ m}$, soit 6 μm .

3. On peut admettre que la distance correspond à 2 diamètres d'une cellule photoréceptrice. Le diamètre d'une cellule photoréceptrice est donc de l'ordre de 3 μm .

La rétine constitue la surface sensible de l'œil. Elle est composée d'environ cent millions d'éléments sensibles : les cônes et les bâtonnets. Répartition : environ 5 % de cônes et 95 % de bâtonnets. Les bâtonnets contribuent plutôt à la vision périphérique et nocturne.

Les 6 à 7 millions de cônes sont concentrés dans la *macula*, une zone elliptique de $3 \times 1,5 \text{ mm}$, centrée sur l'axe optique. Au centre de la *macula*, une petite

dépression circulaire de 0,5 mm de diamètre, la *fovea*, regroupe 30 000 cônes. C'est la zone de plus grande discrimination spatiale et de meilleure sensibilité chromatique. La majorité des auteurs admet que le diamètre de cônes est de l'ordre de 5 μm (0,005 mm).

25. I. 1. Il s'agit du principe de propagation rectiligne de la lumière.

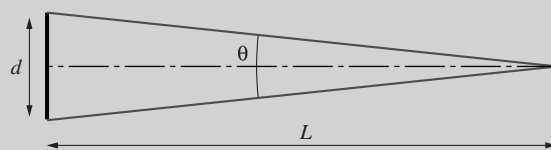
Dans un milieu homogène la lumière se propage en ligne droite.

2. Tous les rayons solaires émis par les différents points du Soleil sont parallèles.

3. Le bâton doit être planté verticalement.

4. La rotation apparente du Soleil doit être négligeable entre les deux mesures.

II. 1.



2. Le diamètre apparent de la Lune : $\tan \theta_L \approx \theta_L = \frac{d}{L}$ est supérieur ou égale à celui du Soleil $\theta_s = \frac{D}{L}$.

En supposant les diamètres apparents égaux (ce qui n'est pas dit directement dans l'énoncé mais se déduit de la phrase : « la Lune est capable d'éclipser exactement le Soleil ») ;

$$\frac{d}{L} = \frac{D}{L} \text{ et } L = D \cdot \frac{\ell}{d} = \frac{1,39 \times 3,84 \times 10^6}{3,48 \times 10^6} = 1,5 \times 10^{11} \text{ m,}$$

soit 150 millions de kilomètres.

3. Diamètre apparent : $\theta \approx \frac{h}{d} = \frac{0,01}{10}$, soit 10^{-3} rad.

Cet angle est supérieur au pouvoir séparateur de l'œil ; il pourra distinguer des détails séparés de 1 cm.

Pour le détail de 1 mm : $\theta = 10^{-4} \text{ rad}$; le détail de 1 mm ne sera pas observable. L'observateur doit se placer à 1 m du tableau.

Afin de ne pas être déchiffré, Léonard de VINCI écrivait à l'envers dans ses carnets de notes et se relisait à l'aide d'un miroir.

Exercices complémentaires

Énoncés

1. Les phases de la Lune

Lorsqu'on observe la Lune depuis la Terre, celle-ci ne présente pas toujours le même aspect : ce sont les phases de la Lune.



nouvelle
Lune



pleine
Lune

1. Donner une interprétation à ce phénomène.

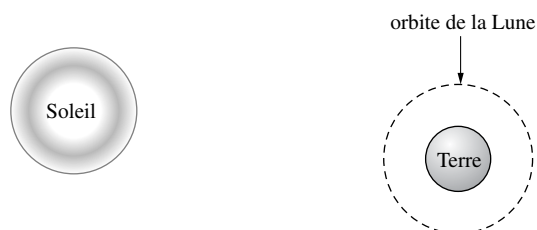
2. Lors d'une phase de pleine Lune, la Lune est-elle visible la nuit ? le jour ?

3. Lors d'une phase de nouvelle Lune, la Lune est-elle visible la nuit? le jour?

2. Éclipses de Lune et de Soleil

Une éclipse totale de Lune se produit lorsque celle-ci est plongée dans le cône d'ombre de la Terre. La Lune peut être obscurcie pendant environ deux heures.

Sur le schéma suivant, on a représenté, sans respecter l'échelle, le Soleil, la Terre et l'orbite de la Lune.



1. Reproduire le schéma, représenter le cône d'ombre de la Terre et placer la Lune dans une région d'éclipse totale.

2. Cette éclipse de Lune, a-t-elle lieu lors de la pleine Lune ou de la nouvelle Lune?

3. Faire un schéma montrant le principe d'une éclipse totale de Soleil. Lorsque ce phénomène se produit, tous les « terriens » peuvent-il le voir?

3. La lumière des éclairs

Un jour d'orage, en voyant un éclair zébrer le ciel, Martin dit à son grand-frère Alex :

« Tu m'as dit que la lumière se déplace en ligne droite, mais ce n'est pas vrai, l'éclair fait des zigzags ».

1. Parmi les arguments ci-dessous lesquels Alex peut-il choisir, pour expliquer le phénomène à son petit frère?

a. les jours d'orage, l'air a la propriété de dévier la lumière en zigzag;

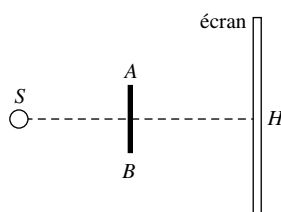
b. l'éclair est une source de lumière qui se déplace en zigzag;

c. la lumière se propage de l'éclair jusqu'à l'œil de Martin en ligne droite.

2. Rédiger un texte de quelques lignes détaillant l'argumentation d'Alex afin de convaincre son petit frère.

4. Ombre portée

Entre une source ponctuelle S et un écran, on place un obstacle opaque. Cet obstacle est un carré de carton, de côté $AB = a = 8$ cm, parallèle à l'écran, placé comme l'indique le schéma en coupe représenté ci-contre. S est sur l'axe de symétrie de l'obstacle.



1. Reproduire le schéma et tracer les rayons qui permettent de limiter la zone d'ombre portée sur l'écran.

2. Quelle est la forme de l'ombre sur l'écran?

3. Calculer les dimensions de l'ombre portée sur l'écran, sachant que la distance source-obstacle est $d = 20$ cm et la distance obstacle-écran est $L = 80$ cm.

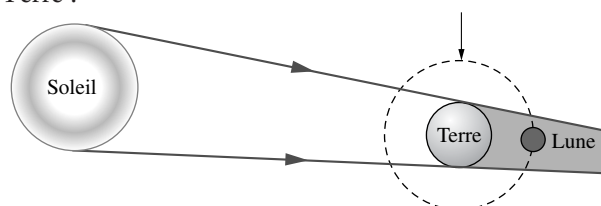
Corrigés

1. 1. La Lune, en tournant autour de la Terre, n'est pas éclairée de la même façon par le Soleil selon sa position. Lors d'une phase de pleine Lune, elle présente une face complètement éclairée par le Soleil alors que lors d'une phase de nouvelle Lune, elle présente une face qui n'est pas du tout éclairée.

2. Lors d'une phase de pleine Lune, la Lune est visible uniquement la nuit ou lorsque le ciel est peu éclairé par le Soleil.

3. Lors d'une phase de nouvelle Lune, la Lune n'est visible ni le jour ni la nuit.

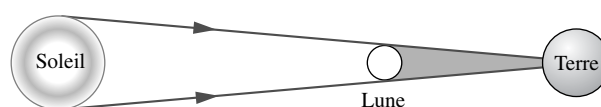
2. 1. Schéma représentant le cône d'ombre de la Terre :



Lorsqu'elle passe dans le cône d'ombre de la Terre, la Lune n'est plus éclairée par le Soleil.

2. Lors d'une éclipse totale, la Lune présente à un observateur terrestre une face complètement éclairée (quand elle n'est pas dans le cône d'ombre); donc ce phénomène se produit lors d'une phase de pleine Lune.

3. Principe d'une éclipse de Soleil :



Tous les « terriens » ne peuvent pas voir une éclipse totale de Soleil en même temps, car la Lune étant plus petite que la Terre, son ombre ne permet pas d'occulter complètement le globe terrestre.

3. 1. Propositions exactes :

b. l'éclair est une source de lumière qui se déplace en zigzag;

c. la lumière se propage de l'éclair jusqu'à l'œil de Martin en ligne droite.

2. L'éclair est une décharge électrique qui se produit entre deux nuages ou bien entre un nuage et la Terre. Lors de cette décharge, des particules électriques se déplacent très rapidement. Le long de ce déplacement, les particules interagissent avec l'air et il se forme de la lumière comme à l'intérieur d'une lampe à décharge.

Le feu d'artifice illustre le mieux l'analogie.

4. 1. Voir le schéma ci-contre.

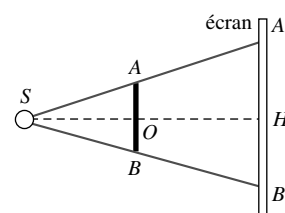
2. L'ombre est un carré.

3. On se place dans le plan de symétrie passant par S ; c'est le plan de la feuille.

Le théorème de THALÈS

$$\text{donne : } \frac{SO}{SH} = \frac{AB}{A'B'} \cdot A'B' = \frac{a \cdot (d + L)}{d} = 40 \text{ cm.}$$

L'ombre portée est un carré de côté 40 cm.



Bibliographie

Ouvrages

- W. KAMINSKI, *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*, Thèse de doctorat de l'université Paris II, 1991.
- L. VIENNOT, *Raisonnement en physique, la part du sens commun*, de Boeck Université, 1996.

Revues

- *Bulletin de l'Union des physiciens*, W. KAMINSKI, « Conceptions des enfants et des adultes sur la lumière », n° 716, p. 973-996, 1989.

- *Bulletin de l'Union des physiciens*, W. KAMINSKI et E. SALTIEL, « Un exemple d'évaluation des nouveaux programmes », n° 786, p. 1271-1287, 1996.

Site Internet

Quelques expériences pour mettre en évidence les propriétés de l'œil sur :

http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/Entree_par_theme/Ondes/Oeil/

Miroirs plans et lentilles convergentes

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

IV. Optique

2. Images formées par les systèmes optiques

Contenus

2. Images formées par les systèmes optiques

2.1 Images données par un miroir plan

- Observation et localisation de l'image d'un objet donnée par un miroir plan.
- Point image conjugué d'un point objet. Lois de la réflexion.

2.2 Images données par une lentille convergente

- Observation et localisation des images données par une lentille convergente.
- Modélisation géométrique d'une lentille mince convergente; centre optique; foyers; distance focale; vergence.
- Modélisation analytique : relations de conjugaison et de grandissement des lentilles minces convergentes.
- La loupe.

Connaissances et savoir-faire exigibles

On attend qu'un élève sache :

- localiser expérimentalement une image;
- déterminer graphiquement la position de l'image d'un point objet dans le cas d'un miroir plan;
- déterminer graphiquement la position de l'image d'un point objet, donnée par une lentille mince convergente;
- utiliser les relations de conjugaison des lentilles minces convergentes; utiliser le grandissement;
- être capable de faire un montage permettant de mesurer la distance focale d'une lentille convergente;
- être capable de prévoir le sens du déplacement d'une image consécutif à un déplacement de l'objet.

Exemples d'activités

- Quelle perception avons-nous de l'image d'un objet dans un miroir?
- Où se trouve l'image d'un objet donné par un miroir plan?
- Expérience dite des deux bougies.

Commentaires

On fera comprendre que la vision humaine donne des images dont le concept est étroitement lié à l'existence du cerveau derrière le récepteur qu'est l'œil. L'interprétation de ces images est liée au conditionnement du cerveau à la propagation rectiligne de la lumière.

Ce concept d'image ne peut donc être confondu avec « l'image » que l'on peut former sur un écran diffusant. Dans les instruments de projection, on récupère, en effet, la lumière transmise par le système optique sur un écran placé dans le plan de l'image (réelle). On ne confondra pas l'écran ainsi éclairé (objet diffusant) avec l'image proprement dite.

À ce niveau, on ne fera pas de distinction entre les notions d'images réelles et virtuelles (et encore moins d'objets réels et virtuels).

On désigne par « point objet » un point de l'objet étudié et par « point image » un point de l'image. L'étude expérimentale des images données par un miroir ou par une lentille pourra être présentée en analogie avec le travail effectué en classe de Seconde sur la parallaxe (localisation d'objets inaccessibles). Les conditions d'obtention des images (conditions de GAUSS) ne seront pas évoquées à ce niveau. Outre la mise en place d'une notion importante, l'introduction de la relation de conjugaison a des objectifs autres que purement disciplinaires. Elle permet de travailler sur des outils mathématiques souvent mal acquis par les élèves : inverses, valeurs algébriques, repérages sur un axe.

Matériel

Cours

> Activité 1

- Une planche ou un bloc de polystyrène sur lequel on peut fixer un miroir plan.
- Des perles de couleur ou des épingles à têtes colorées.

> Activité 2

- Un objet lumineux (bougie par exemple).
- Une lentille convergente.
- Un écran.

> Activité 3

- Un bloc de polystyrène dans lequel on peut enfoncer une lentille convergente.
- Des perles de couleur ou des épingles à têtes colorées.

Rechercher et expérimenter

- Un banc d'optique (source; lentille convergente; écran).
- Un ordinateur avec un tableur.
- Un logiciel de simulation d'une lentille convergente (cédérom universalis).

Voir les sites suivants :

<http://www.atela.uhp-nancy.fr/tisserand/lentille/index.html>

http://economie.u-bourgogne.fr/Optique/Applets/applet_lentille.html

Déroulement du chapitre

> Objectif

Montrer la formation des images données par un miroir plan, puis par une lentille convergente.

Activités préparatoires

A Quand les peintres jouent avec les miroirs...

Réponses aux questions

1. Non, l'image de cet homme devrait être de face.
2. Le reflet de l'homme n'est pas le symétrique de l'homme par rapport au plan du miroir.
3. Le reflet du livre paraît conforme à la réalité.

B. À quoi peut bien servir une lentille convergente en gemmologie ?

Réponses aux questions

1. La loupe permet d'obtenir une image grossie d'un objet.
2. Une lentille convergente.
3. La pierre doit être placée entre la lentille et son foyer et à une distance proche de la distance focale.

Cours

1. Comment se forme une image dans un miroir plan ?

Nous commençons par rechercher la position d'un « point image » (image d'un point objet donnée par un miroir).

Pour cela nous nous appuyons sur l'activité 1 :

Lors de cette étude expérimentale, on peut réinvestir le travail de visée effectué en classe de Seconde sur la parallaxe (localisation d'objets inaccessibles).

Par des visées successives réalisées en alignant l'image et plusieurs épingles, les élèves déterminent la position du point image. Ils constateront ensuite que ce point image est le symétrique du point objet par rapport à l'axe du miroir.

On en profite pour introduire la notion de point conjugué. On généralise ensuite la notion d'image d'un objet comme étant l'ensemble des points images des points objets qui le constituent.

> Activité 1

Réponses aux questions

1. Les positions de S et de S' sont symétriques par rapport au plan du miroir.
2. Lorsque l'on observe l'image S' , la lumière semble provenir de S' pour le cerveau.
3. Pour une position O de l'œil, on commence à tracer le rayon réfléchi dont le prolongement passe par S' (voir le document 3 du cours); ce rayon coupe le plan du miroir en J . On trace ensuite le rayon incident SJ .
4. Voir le cours.

2. Comment observer une image avec une lentille convergente ?

Ce paragraphe est introduit à l'aide d'une activité expérimentale.

Tout d'abord, l'objet est placé loin de la lentille pour recueillir une image à proximité du foyer. L'image est plus petite que l'objet, et renversée.

Ensuite, on diminue progressivement la distance objet-lentille et on observe qu'il faut éloigner l'écran de la lentille afin d'observer une image nette. La taille de l'image augmente.

Si la distance objet-lentille diminue trop, on n'observe plus d'image sur l'écran, mais une image observable à travers la lentille (retour sur l'activité préparatoire B). On peut ensuite chercher à déterminer la position de l'image à l'aide d'une activité analogue à l'activité 1 (miroir).

Par construction graphique, on montre que l'on peut obtenir, dans le cas d'un objet situé à une distance de la lentille inférieure à la distance focale, une image plus grande et dans le même sens que l'objet.

> Activité 2

Réponses aux questions

1. L'image est renversée et plus petite que l'objet.
2. Pour une position donnée de l'objet, l'image a une position déterminée.
3. Lorsqu'on rapproche l'objet de la lentille, l'image s'en éloigne : l'image et l'objet se déplacent dans le même sens.
4. Pour une distance inférieure à la distance focale, il n'est plus possible d'obtenir une image sur l'écran.
5. On observe encore l'image à l'œil nu.

> Activité 3

Réponses aux questions

1. La distance maximale au-delà de laquelle la lentille convergente ne joue plus le rôle de loupe est égale à la distance focale.
2. Les points images A' et B' se situent sur les prolongements des rayons lumineux matérialisés par les épingles.

3. Comment prévoir les caractéristiques de l'image donnée par une lentille convergente ?

On donne les trois règles classiques concernant trois rayons incidents particuliers dont il est facile de tracer les rayons émergents correspondants.

On établit la méthode de construction de l'image.

Des exercices d'applications permettront d'évoquer les problèmes liés aux échelles de représentation (exercices 13 et 14).

Puis on passe à la détermination analytique d'une image. On indique la démarche à suivre pour établir la relation de conjugaison. Il faut insister sur le problème de l'orientation de l'axe optique (sens de propagation de la lumière) et d'un axe perpendiculaire à l'axe optique.

Le grandissement γ est défini et son expression est donnée. On fait ensuite remarquer la signification physique de la valeur algébrique du grandissement.

L'exercice d'entraînement 2 va permettre de présenter les notions de diamètre apparent et de grossissement qui seront utiles dans le chapitre suivant.

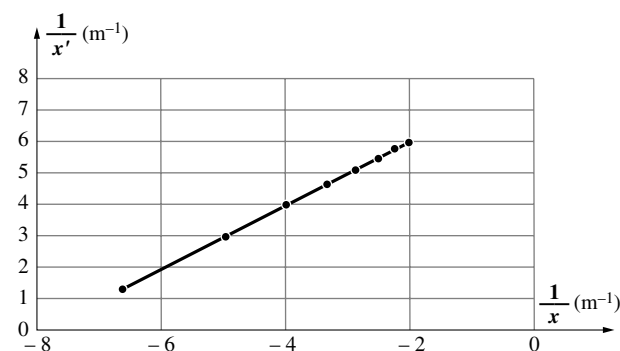
Rechercher et expérimenter

1. Étude expérimentale des caractéristiques de l'image

Une première partie expérimentale permet de travailler sur la position et la taille de l'image formée par une lentille convergente.

Réponses aux questions

1. La distance objet-lentille doit être supérieure à la distance focale.
2. Lorsqu'on augmente la distance lentille-objet, la distance lentille-image diminue : l'objet et l'image se déplacent dans le même sens.
3. Graphique obtenu pour une lentille de distance focale $f = 12,5 \text{ cm}$:



Les points sont bien alignés : on obtient une droite d'équation $\frac{1}{x'} = \frac{a}{x} + b$ où $\frac{1}{x'}$ et $\frac{1}{x}$ sont les variables, a le coefficient directeur et b l'ordonnée à l'origine.

4. Le coefficient directeur de la droite est $a = 1$; l'ordonnée à l'origine est $b = 8$, ce qui correspond bien à la valeur de la vergence de la lentille utilisée.

5. $\frac{1}{OA'} = \frac{1}{OA} + C$, ce qui correspond bien à la formule de conjugaison.

6. On retrouve à l'aide du tableur des valeurs identiques.

2. Validation des résultats à l'aide d'une simulation

La deuxième partie correspond à la validation des résultats précédents à l'aide d'un simulateur.

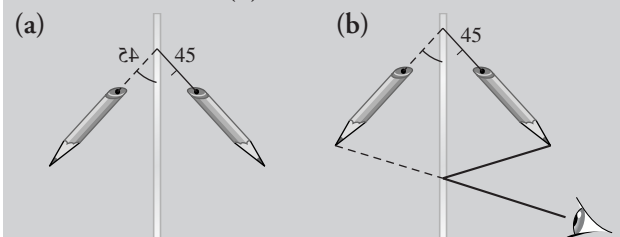
Réponses aux questions

1. a. Si la distance objet-lentille est grande, l'image est proche de la distance focale, au-delà du foyer.
b. L'image s'éloigne et grandit.
c. L'image est de même taille que l'objet, mais renversée.
d. L'image est plus grande que l'objet.
e. L'image est plus petite que l'objet.
f. L'image est proche de la distance focale.
2. la lentille se comporte comme une loupe.

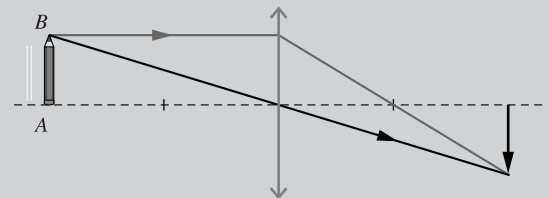
Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. et 2. L'image est symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir. Voir le schéma (a) ci-dessous.
3. Voir le schéma (b) ci-dessous.

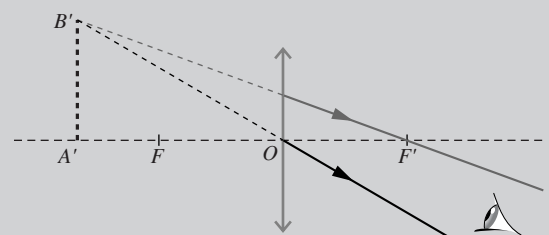


2. 1. • Un rayon incident passant par le centre optique n'est pas dévié.
• Un rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image F' .



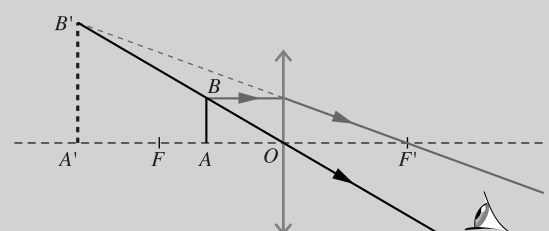
2. L'image est renversée et presque de même taille que l'objet.

3. 1. Construction de l'image $A'B'$:



Pour déterminer l'image B' du point B à travers la lentille, utilisée en loupe, on prolonge les rayons émergents.

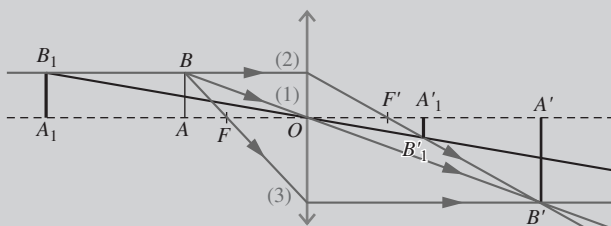
2. Représentation de l'objet AB :



Un rayon incident passant par le centre optique n'est pas dévié.

Un rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image F' .

4. 1. L'objet A_1B_1 donne comme image $A'_1B'_1$.



2. Si l'objet se rapproche du foyer dans la position AB , l'image vient dans la position $A'B'$: elle s'éloigne.

5. $\overline{OA'} = -20 \text{ cm}$; taille $\overline{A'B'} = 5 \text{ mm}$.

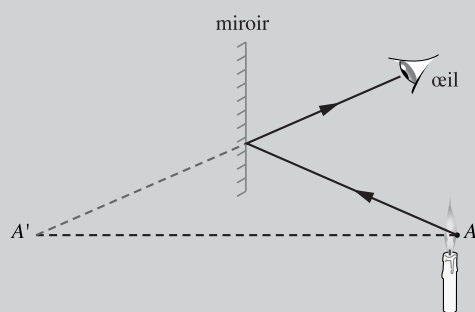
Exercices

1. Propositions exactes :

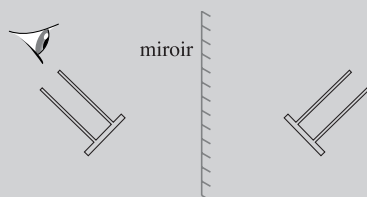
L'image d'un objet, donnée par un miroir plan :

- b.** est de même taille que l'objet ;
- c.** est symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir.

2. 1. 2. et 3. Voir le schéma ci-dessous.

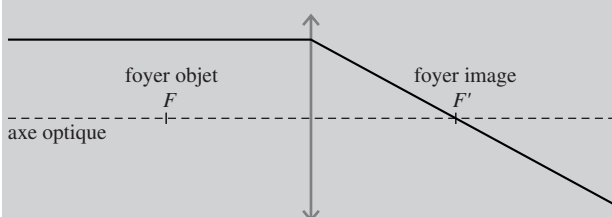


3. 1. Voir le schéma ci-dessous.



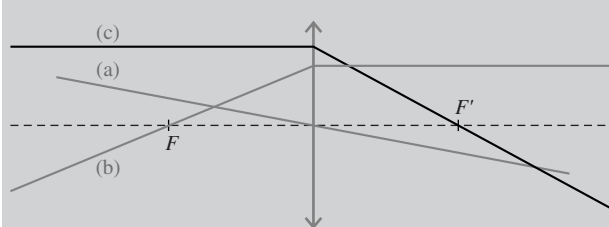
2. Non, la position de l'image ne dépend pas de la position de l'observateur.

4. 1. Schématisation de l'expérience :



2. Marche d'un rayon :

- (a) passant par le centre optique ;
- (b) passant par le foyer objet ;
- (c) parallèle à l'axe optique.



5. 1. L'image du Soleil donnée par la lentille convergente.

2. L'image d'un objet situé à l'infini se situe au foyer image, d'où $f' = 0,10 \text{ m}$.

3. $C = \frac{1}{f'} = 10 \delta$.

6. 1. La relation algébrique liant la position de l'objet $\overline{OA}$ et la position de l'image $\overline{OA'}$ est appelée relation de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = C.$$

$\overline{OA}$ position de l'objet ; $\overline{OA'}$ position de l'image.

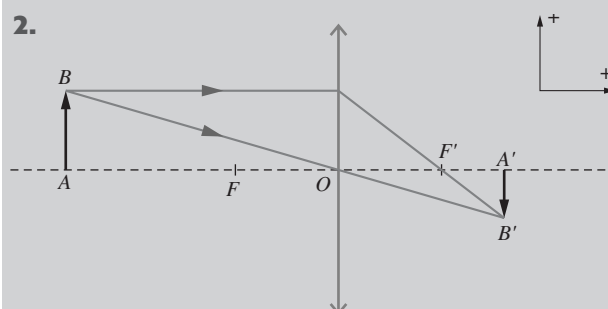
$C = \frac{1}{\overline{OF'}}$ vergence de la lentille.

$\overline{AB}$ taille de l'objet ; $\overline{A'B'}$ taille de l'image.

La relation de grandissement est :

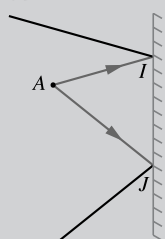
$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}.$$

2.

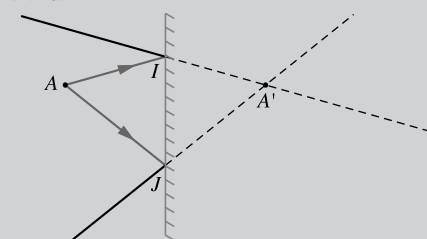


7. Tracés des rayons réfléchis :

1.

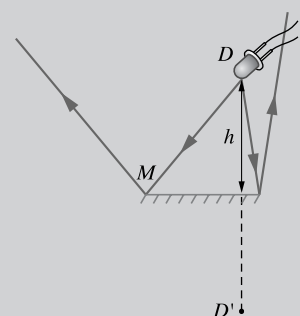


2. a.

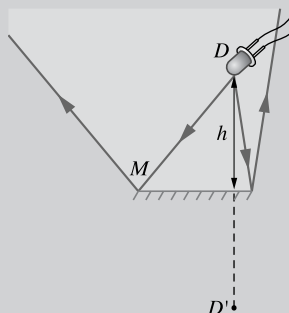


b. A' est le symétrique de A par rapport au plan du miroir.

8. 1. 2. et 3. D' est le point image conjugué de D (voir le schéma ci-contre).



4. Il faut placer l'œil dans la région grisée qui correspond au faisceau réfléchi par le miroir (voir le schéma ci-dessous).



9. 1. Supérieure.

2. Après la lentille.

3. S'éloigne.

4. Diminuent.

10. 1. a. On doit placer l'objet à une distance supérieure à la distance focale.

b. L'image est renversée.

2. a. On place l'objet entre la lentille et le foyer objet et on observe l'image formée à travers de la lentille.

b. L'image est droite.

3. L'image est au foyer image.

4. a. Non, l'écran devrait être à l'infini.

b. Oui, l'image est située à l'infini.

11. 1. a. L'image peut être visualisée sur un écran.

b. La distance lentille-image augmente.

c. La taille augmente.

d. Si la distance de l'objet est inférieure à $2f$, la taille de l'image est toujours supérieure à celle de l'objet.

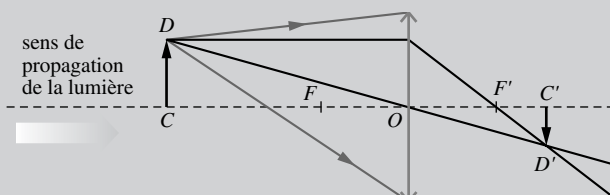
2. a. Non, l'image ne peut pas être visualisée sur un écran.

b. La distance lentille-image augmente.

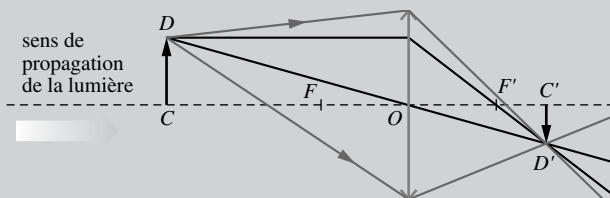
c. La taille de l'image augmente.

d. La taille de l'image est toujours supérieure à celle de l'objet.

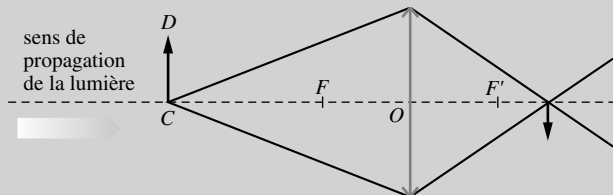
12. 1.



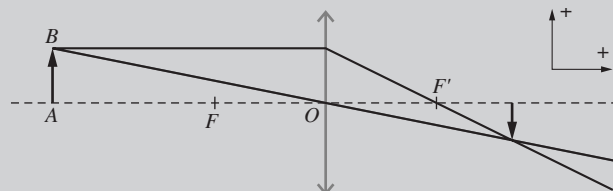
2. Faisceau émergent :



3. Faisceau de lumière issu du point C et traversant la lentille :



13. 1. et 2.

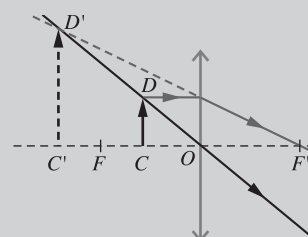


3. a. $OA' = 9$ cm.

b. $A'B' = 0,25$ cm.

4. $OA = -18$ cm ; $OA' = 9$ cm ; $AB = 0,5$ cm ; $A'B' = -0,25$ cm.

14. 1. 2 et 3.



$OC' = -15$ cm ; $C'D' = 12,5$ mm.

4. $C'D' = 2,5$ CD.

15. 1. $OA = -1$ m ; $OF = -5 \times 10^{-2}$ m ; $OF' = 5 \times 10^{-2}$ m

2. $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = C$ et $\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA}$.

3. a. $OA' = 5,3$ cm.

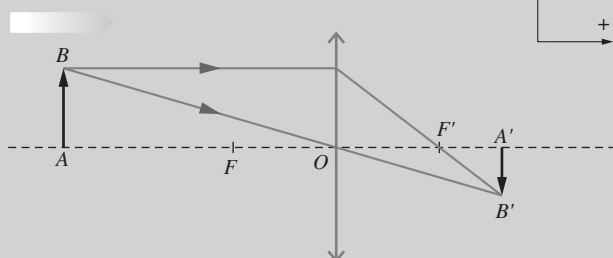
b. $\gamma = -5,3 \times 10^{-2}$; l'image est renversée et de plus petite taille.

c. $A'B' = -0,53$ cm.

16. 1. Oui, car la distance bougie-lentille est supérieure à la distance focale.

2.

sens de propagation de la lumière



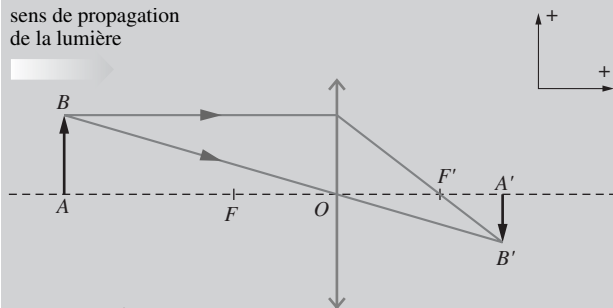
3. a. Position de l'image : $OA' = 87$ cm ; elle se trouve derrière la lentille.

b. Taille : $A'B' = -48$ cm.

4. L'image de la bougie est 4,8 fois plus grande et elle est renversée.

17. 1.

sens de propagation
de la lumière

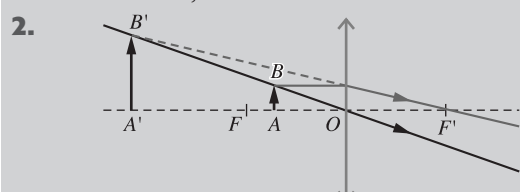


2. $\gamma = -5,7$.

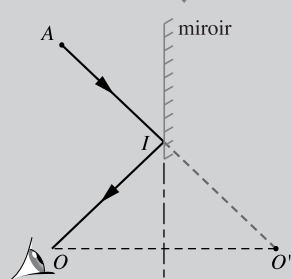
3. $C = 20 \delta$.

18. 1. Position : $\overline{OA'} = -23 \text{ cm}$.

Taille : $\overline{A'B'} = 2,0 \text{ cm}$.



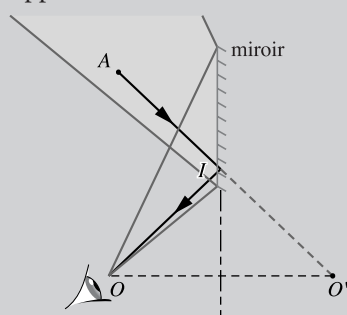
19. 1.



2. a. Le rayon incident AI se réfléchit selon le rayon IO qui pénètre dans l'œil de l'observateur.

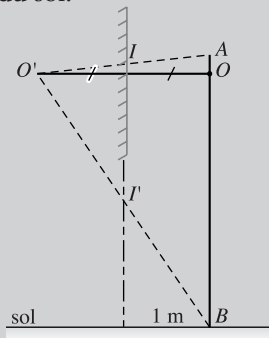
b. Si le point I n'appartient pas à la surface réfléchissante du miroir, on ne peut pas trouver de rayon réfléchi qui pénètre dans l'œil de l'observateur.

3. Le champ de vision du miroir est représenté ci-dessous : c'est le domaine de l'espace, du côté de la surface réfléchissante, délimité par les rayons qui passent par O' et qui s'appuient sur le contour du miroir.



20. Nous supposons que la base du miroir se situe à 80 cm du sol.

1.



2. Vrai : voir l'exercice 19.

3. Mélanie peut voir le point A au sommet de son crâne, mais elle ne peut pas voir le point B à la base de ses pieds.

4. D'après le théorème de THALES :

$$\frac{OO'}{d} = 2 = \frac{OB}{OB - h};$$

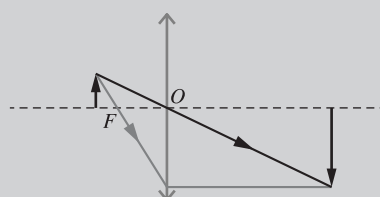
d'où : $h = \frac{OB}{2} = 60 \text{ cm}$.

b. La distance h doit être de l'ordre de la moitié de sa taille.

5. Elle doit abaisser son miroir.

6. La distance séparant Mélanie du mur est sans importance, car si elle s'éloigne du miroir son image s'éloigne d'autant !

21. 1.



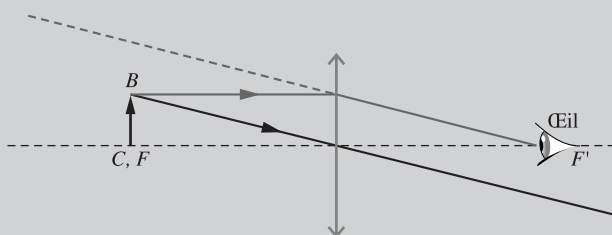
2. Sur le schéma, la hauteur du santon est de 0,8 cm, soit une hauteur réelle de 1,6 cm.

3. Sur le schéma, on trouve une distance focale de 1,6 cm, soit une distance focale réelle de 8 cm, donc une vergence de 12δ .

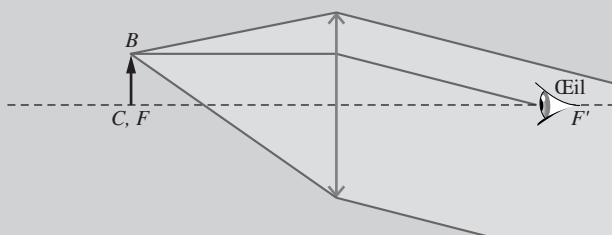
4. $\gamma = 5$; d'où la taille du santon est $\frac{8}{5} = 1,6 \text{ cm}$.

Vérification : $C = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA}$; $C = 12 \delta$.

22. 1., 2. et 3. a. L'objet étant placé au foyer objet de la lentille, l'image est à l'infini.

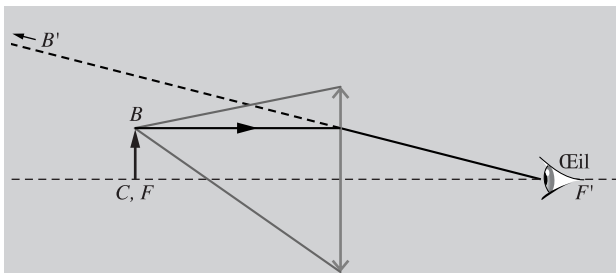


3. b. Marche d'un faisceau issu de B et s'appuyant sur les bords de la lentille



Les rayons extrêmes du faisceau sortant de la lentille sont parallèles au rayon émergent passant par le foyer F' et issu de B .

4. Marche du rayon lumineux issu de B' et pénétrant dans l'œil de l'observateur.

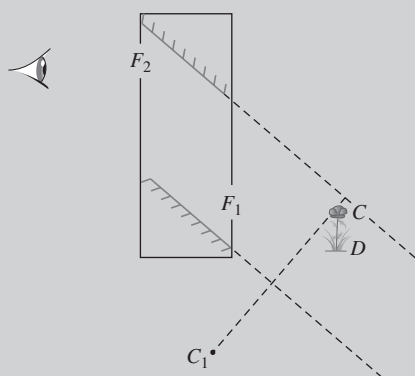


5. a. $\theta' \approx \tan \theta' = \frac{0,1}{50} = 2 \times 10^{-3} \text{ rad.}$

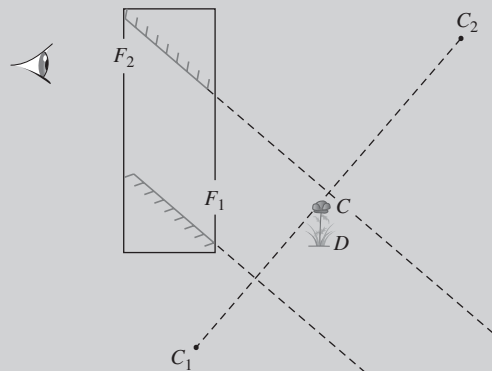
b. $\theta \approx \tan \theta = \frac{0,1}{250} = 4 \times 10^{-4} \text{ rad.}$

c. $G = 5$; la lettre apparaît grossie 5 fois.

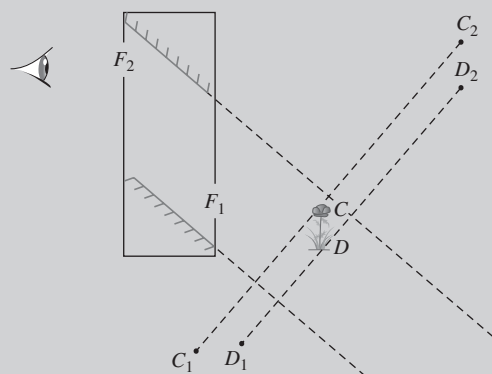
23. 1. et 2. a. Image C_1 du centre C de la fleur, donnée par le miroir M_1 .



2. b. Image C_2 du point C_1 , donnée par le miroir M_2 .

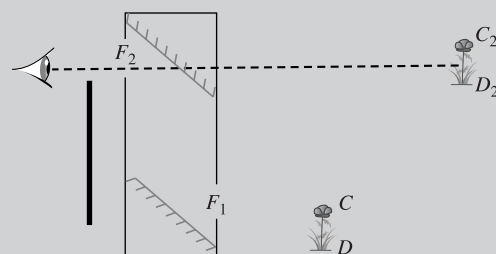


3. Image C_2D_2 de CD , donnée par les miroirs M_1 et M_2 .



4. L'image définitive est droite; elle a subi une translation.

5. Marche du rayon émergent issu du centre de la fleur et pénétrant dans le centre de l'œil.



6. Si un obstacle empêche de voir l'objet, le périscope permet de voir son image.

24. 1. $C = \frac{1}{f} = 58,8 \text{ δ.}$

2. $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = C'.$

$\overline{OA} = -2 \text{ m}$; $\overline{OA'} = 17 \times 10^{-3} \text{ m}$. L'application numérique donne : $C' = 59,3 \text{ δ.}$

3. On applique la formule de conjugaison avec $\overline{OA} = 0,25 \text{ m}$ et $\overline{OA'} = 17 \times 10^{-3} \text{ m}$.

On obtient : $C'' = 62,8 \text{ δ.}$

4. Variation de la vergence : 4 dioptries.

5. On applique la formule de conjugaison avec $\overline{OA} = 0,10 \text{ m}$ et $\overline{OA'} = 17 \times 10^{-3} \text{ m}$.

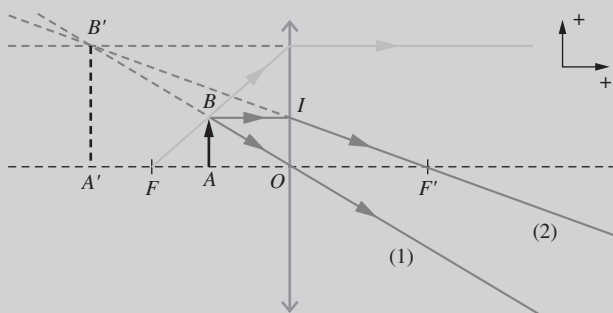
On obtient une vergence $C = 68,8 \text{ δ.}$

25. 1. a. La distance a augmenté.

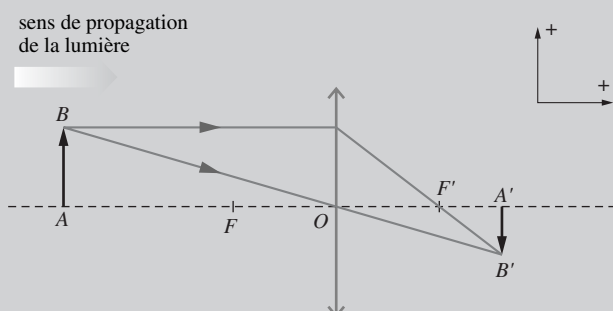
b. La distance est sensiblement la même (taille de l'aquarium identique).

c. Dans la photo de gauche, l'image se situe derrière l'aquarium (par rapport à l'appareil photo) dans la photo de droite, elle se situe devant.

2. Modélisation de la photo de gauche :

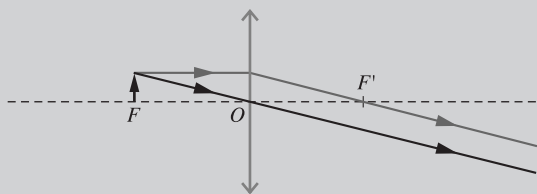


Modélisation de la photo de droite :



26. 1. $f = 10 \text{ cm.}$

2.



3. $\gamma = 500$, soit une largeur d'image de 17,5 m.

27. 1. Distance maximale :

distance focale $f = 19$ mm.

2. On applique la formule de conjugaison des lentilles

avec $\overline{OA} = 18 \times 10^{-3}$ m, $C = \frac{1}{f} = 52,6 \delta$.

On trouve $\overline{OA'} = -34,2$ cm. On en déduit le grandissement $\gamma = 19$.

3. $\theta \approx \tan \theta = \frac{0,5}{250} = 2 \times 10^{-3}$ rad.

4. $\theta' \approx \tan \theta' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A'F'}} = \frac{\gamma \cdot \overline{AB}}{\overline{A'O} + \overline{OF'}} = \frac{19 \times 0,5}{342 + 19} = 2,63 \times 10^{-2}$ rad.

5. $G = \frac{\theta'}{\theta} = 13$.

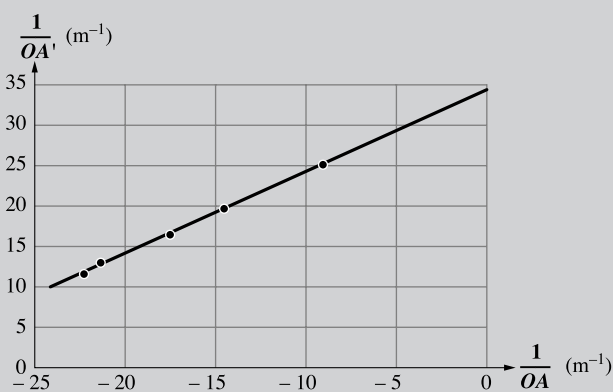
28. 1.

OA (en cm)	11,1	6,9	5,7	5,0	4,7	4,5
OA' (en cm)	4,0	5,1	6,1	?	7,8	8,6

On trace $\frac{1}{\overline{OA'}}$ en fonction de $\frac{1}{\overline{OA}}$ afin de vérifier la

formule de conjugaison $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = C$.

$\overline{OA'} = \overline{OA}$, $\overline{OA} = -\overline{OA}$.



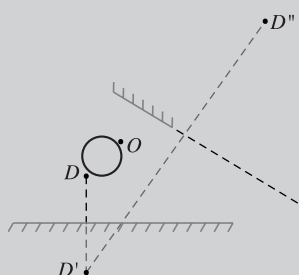
2. Vergence $C = 34 \delta$, d'où $f = 2,9$ cm.

3. $\frac{1}{\overline{OA'}} = 14 \text{ m}^{-1}$, d'où $\overline{OA'} = 7,1$ cm.

29. 1. Un rayon issu du dos de l'artiste ne peut se refléter dans le miroir face à lui et ne peut donc pas être perçu.

2. a. et b.

L'œil est placé en O.



c. Le point D'' est placé devant l'artiste; il est donc visible.

30. 1. c. Le rayon émergent passe par le foyer image.

2. c. Elle est renversée, car la distance objet-lentille est supérieure à f , et plus petite, car elle est supérieure à $2f$.

3. b et d.

4. b. c. d.

5 a. c. d.

Exercice supplémentaire

Énoncé

Lentilles et miroirs (D'après bac Asie juin 2004)

Cet exercice comporte 5 affirmations indépendantes toute réponse doit être accompagnée de sa justification. Vous répondrez donc par VRAI ou FAUX en justifiant votre choix.

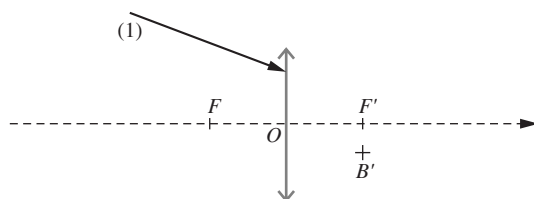
1. Suivant sa position par rapport au miroir, l'image $A'B'$ d'un objet AB donné par un miroir plan peut être plus grande ou plus petite que l'objet.

2. L'image $A'B'$ d'un objet AB donnée par un miroir plan est la symétrique de AB par rapport au plan du miroir.

3. On dispose d'une lentille convergente de 10 cm de distance focale. Sa vergence est $C = 0,1 \delta$.

4. On dispose d'une lentille convergente de 10 cm de distance focale. L'image $A'B'$ d'un objet AB placé devant la lentille, à 60 cm du centre optique se forme derrière la lentille, à 12 cm du centre optique.

5. Après avoir traversé la lentille, le rayon (1) passe par le point B' .



Corrigé

1. **Faux** : l'image $A'B'$ d'un objet AB donnée par un miroir plan est symétrique de l'objet AB par rapport au plan du miroir; en conséquence l'image et l'objet ont même taille.

2. **Vrai** : tous les rayons issus d'un point A d'un objet et se réfléchissant sur le miroir semblent provenir du point image A' , conjugué du point A et symétrique de celui-ci par rapport au plan réfléchissant.

Il en est de même pour tous les points de l'objet : l'image est symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir.

3. **Faux** : la vergence en dioptrie est l'inverse de la distance focale exprimée en mètre.

$$C = \frac{1}{0,1} = 10 \delta.$$

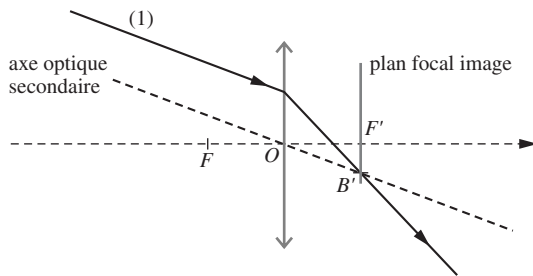
4. **Vrai** : appliquer la formule de conjugaison :

$$C = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} \text{ avec } \overline{OA} = -0,6 \text{ m et } C = 10 \delta.$$

$$\frac{1}{OA'} = C + \frac{1}{OA} = 10 + \frac{1}{(-0,6)} = 8,34$$

soit $\overline{OA'} = 0,12 \text{ m} = 12 \text{ cm}$.

5. **Vrai** : tracer un rayon parallèle au rayon (1) et passant par O . L'intersection de ce rayon avec le plan focal image est B' , foyer image secondaire. Or tout rayon incident parallèle à un axe optique (principal ou secondaire) émerge de la lentille en passant par un foyer image (principal ou secondaire).



Bibliographie

Sites Internet

- Les ophtalmologistes

<http://www.ophtalmologie-officiel.com/>

<http://www.snof.org/>

- Histoire de l'ophtalmologie

<http://www.snof.org/histoire/histoire.html>

- L'œil

<http://telesun.insa-lyon.fr/~telesun/humain/L01/titre.html>

- Animation sur l'œil

<http://www.ac-grenoble.fr/phychim/propos/images/œil.htm>

- L'œil et ses anomalies

<http://www.mlink.net/~biopress/bpvol2no11.html>

- Essilor

<http://www.essilor.fr/vision-et-vous/index.html>

- Afflelou

http://www.alinafflelou.com/vision/b_verres.htm

Quelques instruments d'optique

Programme

Ce chapitre correspond à l'extrait suivant du programme officiel :

IV. Optique

3. Un exemple d'appareil d'optique

Objectifs

L'étude d'un instrument d'optique simple illustrera l'étude effectuée, par exemple en montrant, dans le cas d'une lunette astronomique, comment l'association de lentilles convergentes bien choisies permet d'observer des objets éloignés sous un angle plus grand qu'à l'œil nu.

Contenus

3. Un exemple d'appareil optique

Modélisation expérimentale d'un instrument d'optique simple : lunette astronomique, lunette terrestre ou jumelles, appareil de projection ou de rétroprojection...

Connaissances et savoir-faire exigibles

Comprendre les rôles des éléments constitutifs d'un appareil d'optique n'utilisant que des lentilles convergentes et des miroirs plans.

Exemples d'activités

Étude documentaire et expérimentale d'un instrument d'optique tel que* :

- la lunette astronomique ;
- la lunette terrestre ;
- un instrument de projection ou de rétroprojection.

Commentaires

L'étude d'un appareil d'optique permettra d'illustrer les notions introduites ; son choix sera effectué en tenant compte des possibilités expérimentales et des motivations des élèves.

* Activités pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication.

Matériel

Cours

> Activités 1 et 2

- Un banc d'optique.
- Une source lumineuse munie d'un condenseur (lentille de courte distance focale).
- Une diapositive.
- Une lentille L_p de vergence $C_p = 5 \delta$.
- Un écran.
- Un miroir plan.
- Un mètre.

> Activité 3

- Un banc d'optique.
- Deux lentilles convergentes de vergence $C_1 = 5 \delta$ et $C_2 = 20 \delta$.
- Un objet éclairé.
- Un écran translucide.
- Un mètre.

Rechercher et expérimenter

- Un microscope.
- Un banc d'optique.
- Une source de lumière (ensemble lampe-condenseur).
- Un objet qui peut être un texte photocopié sur un transparent.
- Deux lentilles convergentes L_1 et L_2 de vergence $C_1 = 20 \delta$ et $C_2 = 10 \delta$.
- Un écran translucide quadrillé.

Déroulement du chapitre

> Objectifs

- Connaître le rôle des éléments constitutifs d'un appareil d'optique n'utilisant que des lentilles convergentes et/ou des miroirs plans.
- Modéliser expérimentalement un instrument d'optique simple : lunette astronomique, appareil de projection ou de rétroprojection.

Activités préparatoires

A. La camera obscura

Réponses aux questions

1. Le miroir et la lentille permettent d'obtenir une image réduite de l'objet sur la feuille de papier. En évitant la lumière parasite, le manchon de cuir permet à l'image d'être plus contrastée sur le papier.
2. Cette chambre noire ressemble à celle d'un appareil photo.
3. a. Sans lentille ni miroir, de telles chambres utilisaient uniquement le principe de propagation rectiligne : l'image d'un point de l'objet sur l'écran se trouve à l'intersection du plan de l'écran et d'un rayon lumineux issu du point objet et passant par le trou.
b. La lentille permet d'obtenir une image plus nette et plus lumineuse, car elle focalise tous les rayons issus d'un point objet en un seul point, le point image.

B. Les visions de Tintin

Réponses aux questions

1. Tintin utilise une lunette astronomique.
2. Non, on ne peut pas voir correctement l'araignée, car la mise au point ne permet de voir que les objets situés à l'infini.
3. Microscope, rétroprojecteur, projecteur de diapositives... qui permettent de voir des objets très petits ou de projeter des images sur un écran.

Cours

Trois instruments d'optique ont été choisis pour élaborer ce cours :

- le rétroprojecteur, dont la modélisation permet de mettre en œuvre l'association d'une lentille convergente et d'un miroir plan ;
- la lunette astronomique, qui en première approche sera choisie afocale ;
- le microscope dont l'étude est faite dans la rubrique *Rechercher et expérimenter*, son principe est repris dans l'exercice résolu.

1. Quel est le principe de fonctionnement d'un rétroprojecteur ?

> Activité 1

Réponses aux questions

1. La lentille L_C (condenseur) fait converger le faisceau de lumière issue de la lampe sur la diapositive qui joue le rôle d'objet pour la lentille de projection L_p . L_p permet d'obtenir une image très agrandie de l'objet.
2. On vérifie les relations de conjugaison, soit :

$$\frac{1}{O_p A_1} - \frac{1}{O_p A} = C_p \text{ et le grandissement } \frac{O_p A_1}{O_p A} = \frac{A_1 B_1}{AB}$$

> Activité 2

Réponses aux questions

1. On vérifie bien expérimentalement que :
$$O_p A_1 = O_p H + HA'$$
2. La présence du miroir ne modifie pas les dimensions de l'image obtenue, elle ne change que sa position.

2. Quel est le principe de fonctionnement d'une lunette astronomique ?

> Activité 3

Réponses aux questions

1. On schématise deux lentilles de même axe optique et dont les centres sont distants de 12,5 cm l'un de l'autre.
2. L'image intermédiaire $A_1 B_1$ donnée par l'objectif de l'objet AB est dans le plan perpendiculaire à l'axe et contenant le foyer F'_1 (plan focal image de l'objectif), car l'objet est situé à l'infini.
3. À cette distance, le foyer image de l'objectif coïncide avec le foyer objet de l'oculaire (lunette afocale).
En effet : $O_1 O_2 = O_1 F'_1 + F'_1 O_2$;
d'où : $F'_1 O_2 = O_1 O_2 - f_1$
 $= 25 - 20 = 5 \text{ cm}$
or $F_2 O_2 = f_2 = 5 \text{ cm}$, donc F_2 et F'_1 sont confondues.
4. L'image définitive $A'B'$ donnée par le système de lentilles est située à l'infini.

Rechercher et expérimenter

Cette activité peut être faite parallèlement à une manipulation utilisant le microscope en SVT.

1. Étude d'un microscope

Réponses aux questions

1. ① oculaire ; ② tube ; ③ objectif ; ④ platine ; ⑤ condenseur ; ⑥ miroir.
2. L'objectif est situé du côté de l'objet observé : il en donne une image intermédiaire agrandie :
L'oculaire est situé du côté de l'œil : il joue le rôle de loupe.
3. Le miroir permet de renvoyer de la lumière vers le condenseur afin d'éclairer l'objet.
4. Cette expérience permet de déterminer un ordre de grandeur des distances focales de l'objectif et de l'oculaire, car le tube fluorescent, très éloigné de la lentille, peut être considéré comme étant situé à l'infini. Son image se forme dans le plan focal image, à une distance de la lentille égale à la distance focale de la lentille. La mesure de la distance séparant la lentille et l'image du tube fluorescent (sur la paillasse) donne donc une bonne évaluation de la distance focale de la lentille.
5. Les distances focales indicatives sont d'environ 2 cm pour l'oculaire et d'environ 1 mm pour l'objectif.
6. Réglages à effectuer pour obtenir l'observation d'une image nette :
 - mettre sous tension la source de lumière ;
 - ouvrir en grand les diaphragmes ;
 - positionner la préparation à observer sur la platine porte-objet ;
 - préparer la mise au point à un faible grossissement en amenant la préparation à moins d'un millimètre de la lentille de l'objectif ;
 - l'œil placé sur l'oculaire, ajuster l'intensité lumineuse et rechercher la mise au point (vis macrométrique puis micrométrique) en éloignant lentement la platine porte-objet de la lentille de l'objectif.

7. a. Les vis de mise au point permettent de modifier la distance objectif-préparation microscopique pour obtenir une image nette, en déplaçant l'ensemble du tube optique. La distance entre l'objectif et l'oculaire n'est pas modifiée lors des réglages.
8. L'image observée par l'œil est renversée.

2. Modélisation d'un microscope optique

Dans l'expérience proposée initialement, le système n'est pas afocal. La distance entre les centres optiques des lentilles est imposée à 30 cm si l'objet est situé à 7 cm devant l'objectif, on n'observe pas d'image à travers l'oculaire, il faut alors légèrement approcher l'objet AB vers l'objectif. Afin d'observer sans fatigue, l'image intermédiaire A_1B_1 doit se former sur le foyer objet de l'oculaire (théoriquement à partir de 20 cm du centre optique de l'objectif).

Réponses aux questions

Dans cette configuration $O_1O_2 = 30$ cm et $AO_1 = 6,6$ cm environ.

1. L'image intermédiaire A_1B_1 sert d'objet pour l'oculaire.
2. Si l'œil observe sans accommoder, l'image définitive $A'B'$ doit se situer à l'infini. Cela signifie que l'image intermédiaire A_1B_1 se trouve dans le plan focal objet de l'oculaire.
3. Retrouvons à l'aide des relations de conjugaison et de grandissement, la position et la taille de l'image intermédiaire A_1B_1 donnée par l'objectif avec les données expérimentales :

Position de l'image :

Utilisons la relation de conjugaison : $\frac{1}{O_1A_1} - \frac{1}{O_1A} = C_1$
donc :

$$\frac{1}{O_1A_1} = \frac{1}{C_1 + \frac{1}{O_1A}} = \frac{1}{20 + \frac{1}{-0,066}} = \frac{1}{4,9} = 0,20 \text{ m.}$$

L'image intermédiaire se trouverait à environ 20 cm au-delà du centre optique de l'objectif.

Taille de l'image :

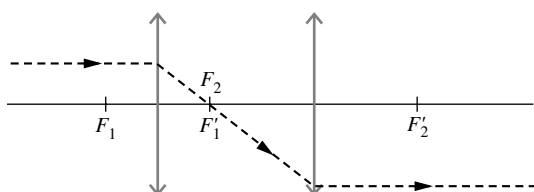
L'objet est un élément vertical du quadrillage de 5,0 mm de haut.

Utilisons la relation de grandissement : $\frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}}$

$$\text{donc : } \overline{A_1B_1} = \overline{AB} \cdot \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = 5,0 \times \left(\frac{20}{-6,6} \right) = -15 \text{ mm.}$$

L'image intermédiaire serait renversée par rapport à l'objet et sa taille est trois fois plus grande que celle de l'objet.

4. Représentation graphique sans échelle d'un système afocal :

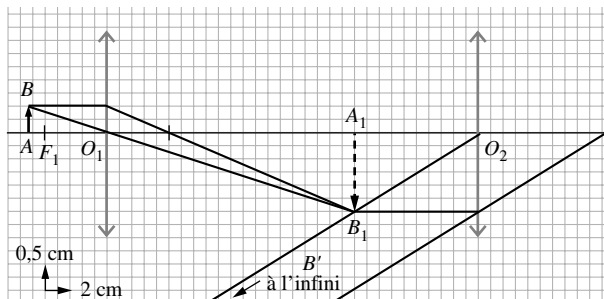


Le foyer image d'un système est le point de l'axe optique où convergent les rayons incidents parallèles à l'axe

optique. Ici, les rayons incidents parallèles à l'axe optique ressortent du système parallèlement à l'axe optique. On ne peut pas définir de foyer image pour un tel système qui est donc qualifié d'*afocal* (étymologiquement « sans foyer »).

5. Schématisation sur papier millimétré, à l'échelle 1/2 selon l'axe optique et 2/1 selon l'axe vertical.

Les conditions expérimentales choisies sont les suivantes : $F_1F_2 = 30$ cm ; $AO_1 = 6,6$ cm ; $AB = 0,50$ cm ; $C_1 = 20 \delta$ et $C_2 = 10 \delta$.



6. C'est l'oculaire qui joue le rôle de loupe dans un microscope. L'image intermédiaire doit être placée au plus près du foyer objet, au foyer ou entre le foyer et le centre de l'oculaire.

Corrigés des exercices

S'autoévaluer

1. 1. La lentille L_p et le miroir M constituent la tête de projection.

2. Le point A_1 représente l'image de A donnée par la lentille L_p . Le point A' représente l'image de A donnée par l'ensemble du dispositif.

3. A_1 et A' sont symétriques par rapport au plan du miroir.

4. Pour obtenir A_1 à partir de la position de A , on construit grâce à deux rayons particuliers (par exemple, le rayon parallèle à l'axe optique et celui passant par le centre optique) l'image B_1 de B telle que AB soit perpendiculaire à l'axe ; le point A_1 est tel que A_1B_1 est perpendiculaire à l'axe optique.

5. La mobilité de la tête de projection permet d'effectuer la mise au point sur l'écran. En modifiant la position de l'objet AB par rapport à la lentille, on obtient par conjugaison une image nette sur l'écran.

2. 1. la lentille L_1 correspond à l'objectif, L_2 à l'oculaire. C'est la lentille L_2 qui joue le rôle de loupe.

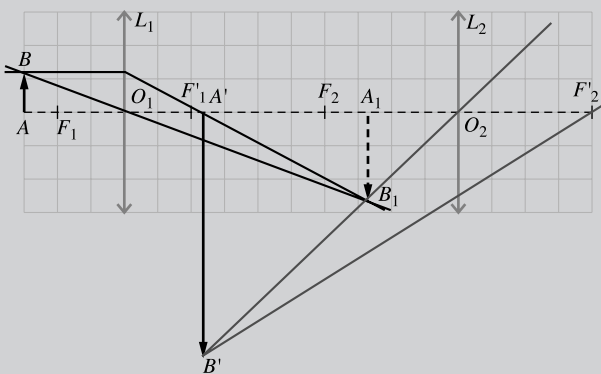
2. L'image intermédiaire se forme dans le plan focal de la lentille L_1 , car l'objet est à l'infini. L'image définitive se forme devant L_2 , car cette dernière lentille joue le rôle de loupe.

3. L'image définitive n'est pas formée à l'infini puisque les rayons émergent de la lentille L_2 ne sont pas parallèles mais convergent à distance finie devant cette lentille.

4. Pour que la lunette soit afocale, il faut que le foyer image F'_1 de L_1 et objet F_2 de L_2 soient confondus ; il faudrait donc rapprocher les deux lentilles.

3. 1. La lentille L_1 est appelée objectif. La lentille L_2 est l'oculaire. L_2 joue le rôle de loupe.

2. Construction des rayons issus de l'objet AB .



3. En pointillés, l'image intermédiaire et en trait continu l'image définitive.

4. Pour observer l'image, l'œil doit être placé derrière la lentille L_2 .

Exercices

1. Lampe ④; surface de projection ⑥; miroir de redirection ⑤; lentille jouant le rôle de condenseur ②; vis de mise au point ⑦; lentille de projection ①; miroir de projection ③.

2. a. $A'B'$ est l'image de l'objet AB donnée par le rétroprojecteur.

b. A_1B_1 est l'image intermédiaire de AB donnée par la lentille L_1 .

c. A_1B_1 , image intermédiaire, joue le rôle d'objet pour le miroir M .

3. 1. a. Une lunette astronomique sert à observer des objets très lointains.

b. Elle est constituée de deux lentilles convergentes : l'objectif et l'oculaire.

2. a. $A'B'$ est l'image de l'objet AB donnée par la lunette.

b. A_1B_1 est l'image intermédiaire de l'objet AB donnée par la lentille L_1 .

c. A_1B_1 , image intermédiaire, joue le rôle d'objet pour la lentille L_2 .

3. La distance entre l'objectif et l'oculaire est la somme des distances focales des deux lentilles, car pour avoir une lunette afocale le foyer image de l'objectif doit être confondu avec le foyer objet de l'oculaire, or l'objectif a une très grande distance focale.

4. 1. Le foyer image de l'objectif coïncide avec le foyer objet de l'oculaire. La distance d entre objectif et oculaire est telle que $d = f_1 + f_2$.

2. L'image intermédiaire donnée par l'objectif est dans le plan focal image de l'objectif (plan contenant F'_1). Elle est renversée par rapport à l'objet observé.

3. L'image définitive est située à l'infini devant l'oculaire et elle est renversée par rapport à l'objet observé.

5. a. Faux. **b.** Vrai. **c.** Faux. **d.** Vrai. **e.** Vrai.

6. 1. a. Un microscope sert à observer des objets très petits.

b. Il est constitué de deux lentilles convergentes : l'objectif et l'oculaire.

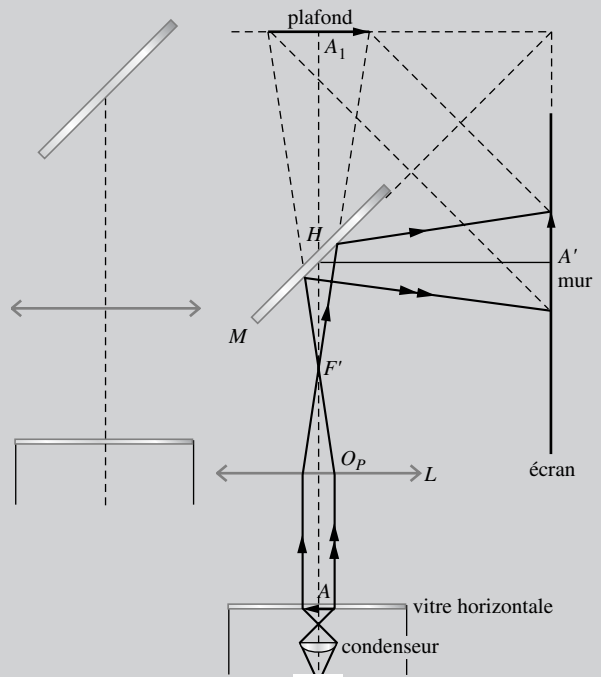
2. a. L_1 correspond à l'objectif; L_2 correspond à l'oculaire et joue le rôle de loupe.

b. La longueur de A_1B_1 est supérieure à celle de AB .

c. Pour une observation sans accommodation, l'image définitive doit être à l'infini devant l'oculaire, l'image intermédiaire A_1B_1 doit donc être dans le plan focal objet de l'oculaire.

7. 1.

2.



a. D'après les propriétés du miroir, les distances HA' et HA_1 sont égales, car A' est l'image de A_1 par le miroir. Donc $HA_1 = 1,90$ m.

b. La distance O_pA_1 est la somme de O_pH et HA_1 , donc $O_pA_1 = O_pH + HA_1 = 0,10 + 1,90 = 2,00$ m.

c. La relation de conjugaison des lentilles minces permet d'écrire que : $\frac{1}{O_pA_1} - \frac{1}{O_pA} = C$,

donc $\left(\frac{1}{O_pA}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{O_pA_1} - C\right)^{-1} = -(2,5)^{-1} = -0,40$ m.

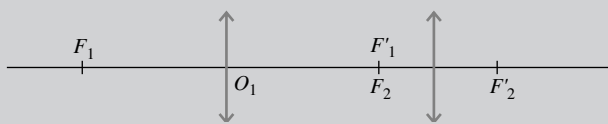
Le point A du document est placé 40 cm au-dessous du centre optique de la lentille.

8. 1. L'objectif est une lentille convergente à travers laquelle est observé un objet céleste. L'oculaire est une lentille convergente derrière laquelle on place son œil pour observer l'image de l'objet donnée par l'objectif.

2. L'objet observé étant très éloigné, on le considère comme placé à l'infini, donc son image à travers l'objectif se forme dans le plan focal image de celui-ci.

3. L'image intermédiaire doit être objet pour l'oculaire, placé au foyer objet de cette lentille.

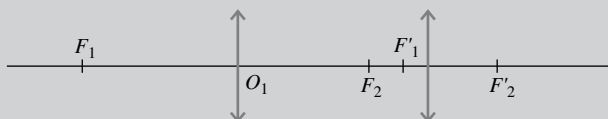
4. Schéma de la lunette :



Le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire, donc la distance qui sépare les lentilles est : $O_1 O_2 = f_1 + f_2 = 22 \text{ cm}$.

5. Si l'insecte est posé sur l'objectif, pour l'oculaire, tout se passe comme si l'image intermédiaire $A_1 B_1$ était localisée sur L_1 . Dans ce cas, $A_1 B_1$ l'objet serait situé avant son foyer objet, L_2 ne jouerait plus le rôle de loupe. L'image de l'insecte ne serait pas avant mais après L_2 et elle serait impossible à observer compte tenu de la position de l'œil.

6. Lorsque l'image définitive n'est pas à l'infini, l'image intermédiaire est située à une distance de l'oculaire inférieure à la distance focale de celle-ci (effet loupe). Donc la distance entre l'objectif et l'oculaire est inférieure à 22 cm (voir le schéma dans le test 2 de *S'autoévaluer*).



9. 1. D'après la relation de conjugaison des lentilles minces : $\frac{1}{O_1 A_1} - \frac{1}{O_1 A} = \frac{1}{O_1 F'_1}$,

$$\text{donc : } \frac{1}{O_1 A_1} = \frac{O_1 A \cdot O_1 F'_1}{O_1 A + O_1 F'_1}$$

$$\frac{1}{O_1 A_1} = \frac{-4,1 \times 10^{-3} \times 0,40 \times 10^{-2}}{-4,1 \times 10^{-3} + 0,40 \times 10^{-2}} = 0,164 \text{ m,}$$

soit 16,4 cm.

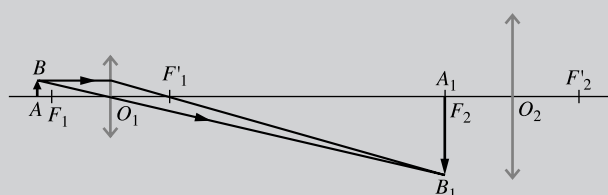
D'après la relation du grandissement : $\frac{O_1 A_1}{O_1 A} = \frac{A_1 B_1}{AB}$,

donc :

$$\frac{O_1 A_1}{O_1 A} = \frac{A_1 B_1}{AB} \cdot \frac{O_1 A}{O_1 A_1} = 2,0 \times 10^{-6} \times \left(\frac{0,164}{-4,1 \times 10^{-3}} \right) = -8,0 \times 10^{-5} \text{ m.}$$

L'image intermédiaire est grossie 40 fois et elle est renversée.

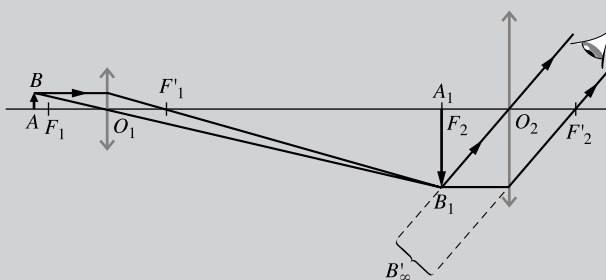
2. Schéma du microscope :



$$O_1 O_2 = d = 18,4 \text{ cm.}$$

3. Oui, ici l'image intermédiaire est placée dans le plan focal objet de la lentille oculaire, donc l'image donnée par celle-ci se situe à l'infini et l'œil qui l'observera ne fatiguera pas.

4. Schéma avec l'image définitive $A'B'$:



10. 1. Le miroir concave et le condenseur servent à réfléchir et à faire converger le maximum de lumière sur l'objet éclairé : la diapositive.

2. Soit A' l'image du point A . D'après la relation de conjugaison des lentilles minces :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f},$$

$$\text{donc : } \frac{1}{OA'} = \frac{OA \cdot f}{OA + f}$$

$$\frac{1}{OA'} = \frac{-12 \times 10^{-2} \times 9 \times 10^{-2}}{(-12 + 9) \times 10^{-2}} = 0,36 \text{ m.}$$

3. On constate que l'image est renversée, donc pour obtenir une image droite sur l'écran, il faut retourner la diapositive.

4. D'après la relation de conjugaison des lentilles minces :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f},$$

$$\text{donc : } \frac{1}{OA} = \frac{OA' \cdot f}{f - OA'} = \frac{4,5 \times 9 \times 10^{-2}}{9 \times 10^{-2} - 4,5}$$

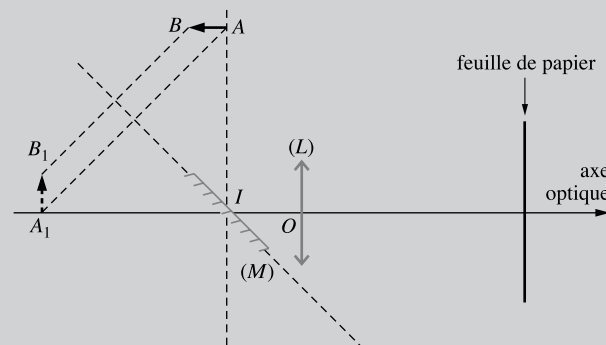
$\frac{1}{OA} = -9,18 \times 10^{-2} \text{ m}$: la diapositive doit être placée à 9,2 cm devant l'objectif.

5. Grandissement de l'objectif :

$$\gamma = \frac{OA'}{OA} = -\frac{4,5}{9,18 \times 10^{-2}} = -49.$$

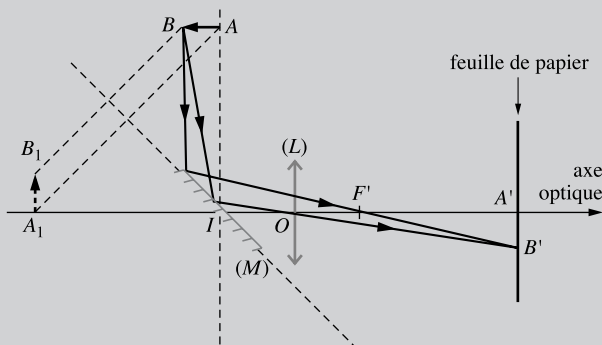
6. Les dimensions de l'image sur l'écran sont $0,024 \times 49 = 1,17 \text{ m}$ et $0,036 \times 49 = 1,76 \text{ m}$. L'écran conseillé convient.

11. 1. Image $A_1 B_1$ donnée par le miroir (M) : A_1 et B_1 sont les symétriques de A et B par rapport au miroir.



2. Le point B' est obtenu en traçant le rayon issu de B_1 passant par O : à l'intersection de ce rayon et du plan de la feuille se trouve nécessairement B' , car l'image se forme sur la feuille. On peut ensuite tracer

le rayon parallèle à l'axe optique issu de B_1 : il émerge en convergeant aussi vers B' et en coupant l'axe optique en un point particulier, le foyer image F' de la lentille L . C'est ainsi que l'on détermine graphiquement la position de F' .



3. Comme A et A_1 sont symétriques par rapport à (M) , $IA = IA_1$, donc :

$$\overline{OA_1} = \overline{OI} + \overline{IA_1} = -0,10 - 1,9 = -2,0 \text{ m.}$$

D'après la relation de conjugaison des lentilles

$$\text{minces : } \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA_1}} = \frac{1}{f} = C,$$

il vient que :

$$\overline{OA'} = \frac{1}{C + \frac{1}{\overline{OA_1}}} = \frac{1}{2,5 + \frac{1}{-2,0}} = 0,50 \text{ m.}$$

4. Grandissement : $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{0,5}{-2,0} = -0,25,$

$$\text{donc } \overline{A'B'} = \gamma \cdot \overline{AB} = -0,25 \times 0,32 = -0,080 \text{ m} \\ = -8,0 \text{ cm.}$$

12. 1. D'après la relation de conjugaison des lentilles :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f};$$

$$\overline{OA} = \frac{1}{\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{f}} = \frac{f \cdot \overline{OA'}}{f - \overline{OA'}} = \frac{0,1 \times 3,0}{0,1 - 3,0} = -0,1 \text{ m.}$$

La diapositive doit donc être placée à 10 cm avant l'objectif (signe (-)).

2. Grandissement de l'objectif :

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{3,0}{-0,10} = -30.$$

L'image est renversée par rapport à l'objet, ses dimensions sont multipliées par 30. Ses dimensions sur l'écran seront donc de 72 cm × 108 cm.

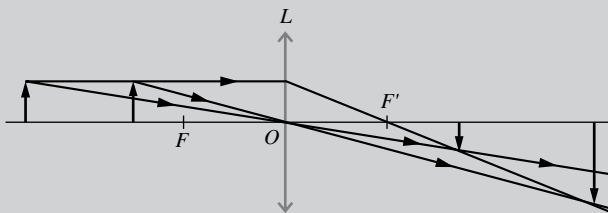
3. L'image donnée par une lentille convergente et l'objet se déplacent dans le même sens. Donc si on recule l'écran, on doit rapprocher l'objectif de la diapositive.

13. Partie A

L'objet observé étant à l'infini, l'image se trouve dans le plan focal image $\overline{OA'} = \overline{OF'} = 50 \text{ mm.}$

Partie B

1. Lorsque l'objet se rapproche de la lentille, alors la distance lentille-pellicule augmente.



2. a. D'après la relation de conjugaison des lentilles minces :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f},$$

$$\text{donc } \overline{OA} = \frac{1}{\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{f}} = \frac{f \cdot \overline{OA'}}{f - \overline{OA'}} \\ = \frac{(50 + 5) \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-3}}{(50 - 55) \times 10^{-3}} = -0,55 \text{ m.}$$

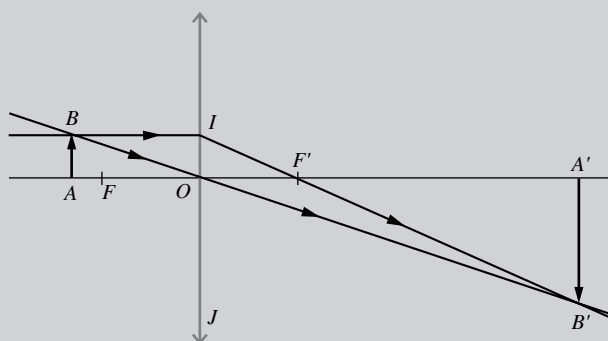
L'objet ne doit pas se trouver à moins de 55 cm de l'objectif.

b. $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{55 \times 10^{-3}}{-0,55} = -0,10.$

14. 1. La vergence C d'une lentille est l'inverse de sa distance focale : $C = \frac{1}{f}$. La distance focale de la

lentille étudiée est : $f = 5,0 \times 10^{-2} \text{ m.}$

2. On trace de part et d'autre de l'axe optique, deux droites parallèles à celui-ci : l'une située à 1 cm au-dessus et l'autre à 3 cm. Ces deux droites passent respectivement par une extrémité de l'objet et par l'image avec un grandissement de 3 en valeur absolue (l'image sur le papier photographique est forcément renversée avec une lentille). On place ensuite l'objet à une distance arbitraire de la lentille, puis on trace le rayon passant le centre optique de la lentille. Il n'est pas dévié : son intersection avec la droite sous l'axe donne la position du point B' de l'image.



3. $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \overline{OA'} \cdot \left(\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{f} \right) = 1 - \frac{\overline{OA'}}{f}$

$$\text{donc } \overline{OA'} = f \cdot (1 - \gamma) \text{ et } \overline{OA} = \frac{\overline{OA'}}{\gamma} = f \cdot \frac{1 - \gamma}{\gamma}.$$

4. Pour le grandissement $\gamma = -3$: $\overline{OA'} = 200 \text{ mm}$ et $\overline{OA} = -66,7 \text{ mm.}$

Pour le grandissement $\gamma = -20$: $\overline{OA'} = 1,05 \text{ m}$ et $\overline{OA} = -52,5 \text{ mm.}$

Les distances lentille-écran sont comprises entre 20,0 cm et 1,05 m.

15. A. Compréhension du texte

1. Le réflecteur M est un miroir.
2. L'expression forte lentille fait référence à une lentille très convergente, donc de faible distance focale.
3. Aujourd'hui, on parlerait d'image agrandie.

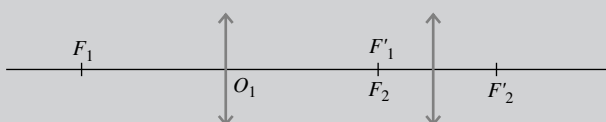
B. Questions autour du texte

1. a. Cette lanterne magique s'apparente au projecteur de diapositives.
- b. On pourrait utiliser n'importe quel matériau transparent à la place du verre.
2. Les objets doivent être peints sur du verre qui s'interpose entre le dispositif d'éclairage et le système optique, car il faut que la lumière puisse passer à travers.
3. Cette lanterne comporte : un miroir M permettant de concentrer l'éclairage, une lentille L jouant le rôle de condenseur, deux lentilles m assimilées à une seule très grossissante (lentille de projection).
4. La « forte lentille » permet de faire converger les rayons lumineux vers l'objet sur une courte distance.
5. Il s'agit du foyer objet de la lentille. L'objet est donc placé un peu avant le foyer objet, l'image est alors située de l'autre côté de la lentille, loin de celle-ci.

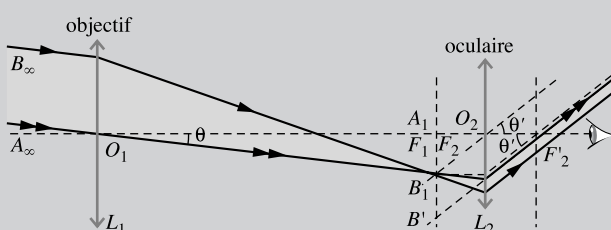
16. 1. Le texte parle de verres, il s'agit vraisemblablement de deux lentilles convergentes (éventuellement verres utilisés pour la vision)

2. Plus l'image intermédiaire est grande, plus l'image finale sera grande.
3. Une lunette afocale est telle que le foyer image de l'objectif coïncide avec le foyer objet de l'oculaire ; elle permet d'avoir une image rejetée à l'infini et de ne pas fatiguer l'œil.

4. Schématisation de la lunette :



5. a. Tracé de la marche des rayons lumineux issus d'un objet B placé à l'infini :



- L'image intermédiaire se trouve dans le plan focal image de l'objectif qui est aussi le plan focal objet de l'oculaire.
 - L'image définitive se forme à l'infini.
 - L'image de l'objet observé à travers la lunette est renversée.
- 6.** $G = \frac{\theta'}{\theta}$. Dans la lunette afocale, les angles θ et θ' sont faibles, donc $\theta \approx \tan \theta$ et $\theta' \approx \tan \theta'$.

$$\text{or } \tan \theta = \frac{A_1 B_1}{f_1} \text{ et } \tan \theta' = \frac{A_1 B_1}{f_2}.$$

$$\text{D'où : } \frac{\theta'}{\theta} \approx \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{(A_1 B_1 / f_2)}{(A_1 B_1 / f_1)} = \frac{f_1}{f_2}.$$

7. Plus le diamètre de l'objectif est grand, plus la quantité de lumière qu'il reçoit est importante. L'image en est alors d'autant plus lumineuse.

17. 1. Les lentilles convergentes sont plus fines sur les bords qu'au centre. Pour les lentilles divergentes, c'est le contraire : elles sont plus fines au centre que sur les bords. Ainsi, en détectant la différence d'épaisseur entre le centre et les bords d'une lentille on peut en déterminer la nature.

2. a. L'inscription $f_1 = 125$ cm est la distance focale de la lentille.

b. La vergence en dioptrie (δ) est l'inverse de la distance focale exprimée en mètre :

$$C = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{1,25} = 0,80 \delta.$$

3. En supposant que la lampe au plafond est un objet situé à l'infini, l'image de cette lampe doit se former dans le plan focal image de la lentille. Donc, en mesurant la distance entre la lentille et l'image formée au sol, on peut évaluer la distance focale de la lentille.

4. La relation de conjugaison des lentilles minces,

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f}, \text{ permet d'écrire que :}$$

$$f = \frac{OA' \cdot OA}{OA - OA'}$$

$$f = \frac{-10 \times 10^{-2} \times 8,2 \times 10^{-2}}{(-10 - 8,2) \times 10^{-2}} = 4,5 \times 10^{-2} \text{ m} = 4,5 \text{ cm}.$$

5. L'image $A_1 B_1$ d'un objet AB considéré comme à l'infini est située dans le plan focal image de l'objectif. L'objectif étant la lentille de distance focale $OF' = 125$ cm, l'image $A_1 B_1$ est dans ce cas située à 125 cm après l'objectif.

6. L'image $A_1 B_1$ sert d'objet pour l'oculaire, elle doit être dans le plan focal objet de l'oculaire pour que l'image définitive se forme à l'infini. L'oculaire étant la lentille étudiée à la question 4, l'image $A_1 B_1$ doit se trouver à 4,5 cm devant l'oculaire.

7. La distance D qui sépare les deux lentilles est :

$$D = O_1 O_2 = O_1 A_1 + A_1 O_2.$$

Comme A_1 est confondu à la fois avec F'_1 et F_2 , $D = O_1 F'_1 + F_2 O_2$, c'est-à-dire la somme des deux distances focales :

$$D = 125 + 4,5 = 129,5 \text{ cm}.$$

8. On a $D = d_1 + d_2$, avec d_1 longueur du grand tube en PVC et d_2 longueur de dépassement du petit tube portant l'oculaire. Il faut donc que $d_1 < D$, soit $d_1 < 129,5$ cm.

De plus, d_2 est petit par rapport à d_1 , donc $d_1 > 100$ cm.

Des trois valeurs proposées, seul le tube en PVC de longueur 120 cm peut être choisi pour réaliser le grand tube en PVC (celui qui porte l'objectif à son extrémité).

Exercices complémentaires

Énoncés

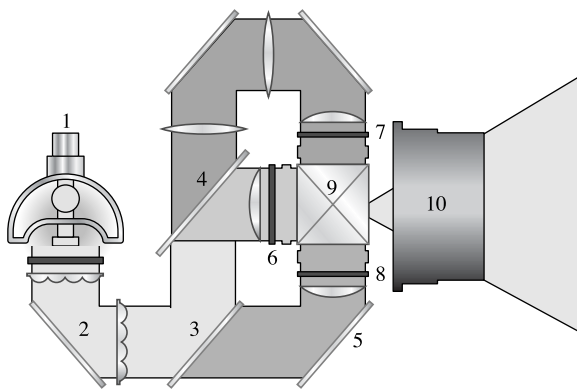
1. Utilisation d'un microscope

Un microscope est muni d'un objectif et d'un oculaire assimilables à des lentilles minces de vergences respectives 100 dioptries et 20 dioptries. La distance entre le foyer image de l'objectif et le foyer objet de l'oculaire est de 16 cm. L'appareil est réglé pour que l'observateur n'ait pas besoin d'accommoder; son œil est placé à proximité de l'oculaire. Il observe des globules rouges de diamètre $AB = 25 \mu\text{m}$. A est situé sur l'axe optique.

1. Où est située l'image $A'B'$ de AB donnée par le microscope?
2. Où est située l'image intermédiaire A_1B_1 donnée par l'objectif?
3. Calculer :
 - a. la distance entre le point A et le centre optique O_1 de l'objectif;
 - b. la taille de l'image intermédiaire.

2. Principe d'un vidéoprojecteur

Un vidéoprojecteur fonctionne sur le même principe que le projecteur de diapositives : une lampe éclaire un objet par transparence afin que le flux lumineux traversant l'objectif forme une image sur un écran. Cet appareil est constitué de lentilles, de miroirs et de prismes.



La lampe ① produit une lumière intense concentrée à l'aide d'un système de microlentilles ②. Des miroirs dichroïques décomposent ensuite cette lumière blanche en faisceaux de couleurs primaires rouge, verte et bleue. Le premier miroir dichroïque transmet un faisceau rouge ③ et réfléchit un faisceau cyan (mélange de « vert » et de « bleu ») vers le deuxième miroir dichroïque ④ qui en isole le vert et réfléchit le bleu. Chacun de ces faisceaux va illuminer un afficheur LCD monochrome (⑥, ⑦, ⑧), lui-même alimenté par la composante primaire correspondante du signal vidéo, mais en niveaux de gris. Un système de prismes ⑨ se charge de fusionner les trois faisceaux lumineux en un seul reconstituant ainsi une image en couleurs naturelles qui se forme sur un écran grâce à l'objectif ⑩.

1. Quels éléments du vidéoprojecteur participent à la formation d'une image?
2. Justifier l'emploi du mot « dichroïque ».

3. Quelle serait la conséquence d'un défaut de réglage des différents miroirs utilisés?

Corrigés

1. 1. L'image $A'B'$ est à l'infini pour que l'observateur n'ait pas besoin d'accommoder.

2. L'image intermédiaire A_1B_1 doit alors être dans le plan focal objet de l'oculaire.

3. a. $\overline{O_1A_1} = \overline{O_1F'_1} + \overline{F'_1F'_2} = 17 \text{ cm}$.

D'après la relation de conjugaison,

$$\frac{1}{\overline{O_1A_1}} - \frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{\overline{O_1F'_1}},$$

d'où $\overline{O_1A} = -0,010 \text{ m}$.

b. $\frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}},$

donc $\overline{A_1B_1} = \overline{AB} \cdot \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = 25 \times \frac{0,17}{-0,01} = -425 \mu\text{m}$.

2. 1. Des miroirs, miroirs dichroïques, lampe, prismes, lentilles participent à la formation d'image à l'aide d'un vidéoprojecteur.

2. *Dichroïque* signifie « qui ne réfléchit que deux couleurs » (du grec *chromos* = couleur). En effet, l'une des trois couleurs primaires est transmise.

3. Les trois faisceaux de couleur primaire n'éclaireraient pas correctement les afficheurs LCD et leur « mélange » ne conduirait pas à la projection des couleurs réelles sur l'écran.

Bibliographie

Ouvrages

- Jean-Philippe PEREZ, *Optique géométrie, ondulatoire et polarisation*, Masson, 1991.
- Luc DETTWILLER, *Les instruments d'optique*, Ellipses, 1997.
- LEVY, LAZZARINI, NUMA, *Optique géométrique et physique*, Ellipses.
- J.-P. DURANDEAU et al., *Physique Spécialité Terminale S*, Hachette, 1999.

Sites Internet

Microscope

- http://www.cndp.fr/themadoc/micro2/prat_simulations.htm
- <http://www2.ac-lille.fr/myconord/micro/reglages06.htm>
- http://www.ac-grenoble.fr/sti-biotechnologies/BPL/microscope_utilisation.htm

Lunette astronomique

- http://www.walter-fendt.de/ph14f/refractor_f.htm

Rétroprojecteur

- <http://www.fsg.ulaval.ca/opus/physique534/complements/autopsi.shtml>

