Mouvements et quantité de mouvement

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Description du mouvement d'un point au cours du temps : vecteurs position, vitesse et accélération. – Référentiel galiléen. – Principe d'inertie. – Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé.	– Choisir un référentiel d'étude. – Définir et reconnaître des mouvements (rectiligne uniforme, rectiligne uniformément varié, circulaire uniforme, circulaire non uniforme) et donner dans chaque cas les caractéristiques du vecteur accélération. – Définir la quantité de mouvement $\vec{p}$ d'un point matériel.

Les compétences à acquérir dans la séquence
1. Choisir un référentiel d'étude.
2. Définir, reconnaître et caractériser des mouvements dans un référentiel d'étude.
3. Définir la quantité de mouvement, connaître et exploiter le principe d'inertie.

Évaluation diagnostique *p. 128*

SITUATION 1

La notion de référentiel, abordée en classe de Seconde, a montré que son choix est capital pour l'étude du mouvement, car la vitesse et la trajectoire dépendent du référentiel d'étude. Ici, la vitesse du dragster est modifiée dans le référentiel route, qui est référentiel terrestre. Le mouvement du véhicule est rectiligne ralenti puisque la vitesse va diminuer et que l'on suppose que la trajectoire est en ligne droite.

Cette notion de référentiel est introduite dans l'**activité 1** puis nous abordons dans l'**activité 3** ce qu'est un référentiel galiléen afin de pouvoir travailler sur les lois de Newton.

SITUATION 2

Le vecteur vitesse est constant si sa valeur, son sens et sa direction ne varient pas. Dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme, seule la valeur de la vitesse est constante, le vecteur vitesse lui ne l'est pas.

Le vecteur vitesse est utilisé dans l'**activité 2** afin de rappeler quelques types de mouvement et de montrer le lien entre les grandeurs vectorielles vitesse et accélération. L'**activité 4** montre l'influence de la masse, ou inertie, sur le mouvement et sur le vecteur vitesse d'un point, et permet d'introduire la grandeur vectorielle quantité de mouvement.

SITUATION 3

En l'absence de frottements, puisque dans le vide, cette sonde se déplace à cette vitesse sans l'action de ses moteurs. Ceux-ci ne sont utilisés que pour modifier très sensiblement sa trajectoire au voisinage d'une planète. On retrouve ici le principe d'inertie, qui est utilisé dans les **activités 3** et **4** pour définir le référentiel galiléen et introduire la quantité de mouvement.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1
Le bon référentiel *p. 130*

1. C'est un solide par rapport auquel on étudie le mouvement.

2. a. La personne qui se déplace dans l'avion.
b. Sa vitesse est modifiée, puisque selon le référentiel elle vaut 5 km · h^{-1} ; 905 km · h^{-1} ou 30 km · s^{-1}.
c. Le premier référentiel est le sol de l'avion, le deuxième le sol terrestre (référentiel terrestre), le troisième est un référentiel lié à la surface du Soleil, il est plus juste de parler en fait de référentiel héliocentrique que de référentiel « solaire » car le référentiel qui sert à l'étude de tels mouvements est lié au centre du Soleil et pas à sa surface.

3. a. Elle est de 900 ± 5 km · h^{-1}, tout dépend du sens dans lequel la personne se déplace avec sa tasse de thé dans l'avion.

b. Le périmètre de l'orbite terrestre est :

$$2\pi R = 2\pi \times 150 \times 10^6 = 9{,}42 \times 10^8 \text{ km.}$$

Il correspond à la distance parcourue en un an, soit :

$$3{,}15 \times 10^7 \text{ s.}$$

La vitesse est donc $v = 9{,}42 \times 10^8/(3{,}15 \times 10^7) \approx 30$ km · s^{-1}.

4. a. Une balle que l'on fait rebondir dans l'avion.

b. Le référentiel avion et le référentiel terrestre.

5. La trajectoire de la balle est modifiée.

6. Trajectoire et vitesse, qui caractérisent le mouvement, sont différentes d'un référentiel à l'autre. Il faut donc toujours préciser quel est le référentiel d'étude.

ACTIVITÉ 2

Looping et accélération *p. 131*

1. a. et **b.** Pour obtenir la trajectoire, il faut relier les points. Les points 0 à 10 sont alignés, la trajectoire est rectiligne. Des points 11 à 20, la trajectoire s'incurve, elle est curviligne. Elle se termine des points 21 à 29 par une portion de cercle, elle est alors circulaire.

2. a. Le vecteur vitesse est dans le sens du mouvement et il a pour direction la tangente à la trajectoire.

b. Des points 0 à 6, le vecteur vitesse augmente, le mouvement est rectiligne accéléré. Jusqu'au point 10, ce vecteur est constant, le mouvement est rectiligne uniforme. Des points 11 à 20, le vecteur vitesse augmente, le mouvement est curviligne accéléré. Il va ensuite diminuer petit à petit, le mouvement devient circulaire ralenti. Des points 22 à 25, la vitesse semble constante, le mouvement est alors circulaire uniforme.

3. a. Le vecteur accélération diminue en grandeur jusqu'au point 4, il est sur la trajectoire et dans le sens du mouvement. Il devient nul par la suite.

b. Le vecteur accélération augmente jusqu'à la position 18. Il diminue ensuite, tout en restant toujours orienté vers l'intérieur de la trajectoire.

L'angle formé entre les deux vecteurs est inférieur à 90° quand le mobile accélère, il devient égal à 90° si l'accélération est constante et est supérieur à 90° quand le système ralentit.

4. Les deux vecteurs vitesse et accélération permettent par leur caractéristiques de décrire un mouvement. S'ils sont colinéaires, la trajectoire est rectiligne, le sens du vecteur accélération par rapport au vecteur vitesse permet de savoir si le mouvement est accéléré ou ralenti. Si le vecteur accélération est nul, le mouvement est rectiligne uniforme. Si les deux vecteurs ne sont pas colinéaires, le mouvement est curviligne (ou circulaire). L'angle alors formé entre les deux vecteurs permet de savoir si le mouvement est accéléré, uniforme ou ralenti.

ACTIVITÉ 3

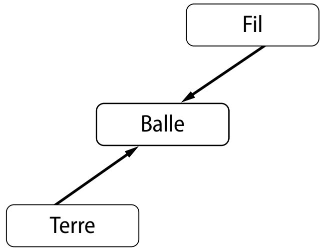
Référentiel et principe d'inertie *p. 132*

1. La balle suspendue.

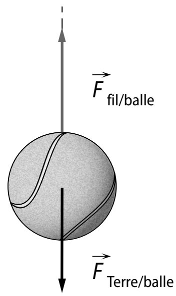
2. a. Dans un référentiel lié à la voiture. On l'appellera le référentiel voiture.

b. Par rapport à la route par exemple. C'est le référentiel terrestre.

3. a. À l'aide du diagramme objets-actions, les actions mécaniques s'exerçant sur la balle sont l'action de la Terre et l'action du fil.



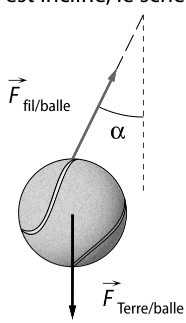
b.



4. Dans le référentiel voiture, la balle est immobile ; dans le référentiel terrestre, elle est animée d'un mouvement rectiligne uniforme. Le principe d'inertie est donc vérifié dans ces deux référentiels, les actions mécaniques qui s'exercent sur la balle se compensent.

5. Dans le référentiel voiture.

6. Les actions mécaniques sont les mêmes, mais comme le fil est incliné, le schéma des forces est le suivant :



7. Non puisque les actions mécaniques ne se compensent pas même si la balle est au repos.

8. a. La vitesse augmente de 90 km · h^{-1} soit 25 m · s^{-1} en 10 secondes. La variation de vitesse est :

$$\Delta v/\Delta t = 25/10 = 2{,}5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Cette grandeur est l'accélération, le mouvement est rectiligne uniformément accéléré puisque l'accélération est constante pendant les 10 secondes.
b. Si le conducteur prend un virage à droite, la balle ira à gauche.
Le mouvement de la voiture est circulaire uniforme car à vitesse (en valeur) constante.
Comme précédemment, le principe d'inertie ne peut être appliqué ici, même si la balle est au repos dans le référentiel voiture, les actions mécaniques qui s'exercent sur elle ne se compensent pas.

9. Dans notre exemple, la voiture, si elle tourne ou accélère par rapport au référentiel terrestre, ne peut être utilisée comme référentiel pour appliquer le principe d'inertie. En généralisant, on ne peut utiliser le principe d'inertie dans un référentiel qui tourne, ralentit ou accélère par rapport à un référentiel où le principe d'inertie peut être appliqué.

ACTIVITÉ 4

Mouvement, masse et vitesse *p. 133*

1. On commence les pesées par la balance de plus grande portée pour connaître l'ordre de grandeur des masses à peser. On choisit ensuite la balance qui donnera la mesure la plus précise. Les masses s'expriment $m \pm \Delta m$.

2. a. Les mobiles sont animés d'un mouvement rectiligne uniforme.
b. On peut appliquer le principe d'inertie aux mobiles dans le référentiel terrestre. Le mouvement étant rectiligne uniforme, les actions mécaniques qui s'exercent sur eux se compensent, ces deux systèmes sont pseudo-isolés.

3. Si m_1 augmente, la vitesse v_2 augmente.

4. Les vecteurs vitesse sont sur la trajectoire et dans le sens du mouvement mais leurs valeurs sont différentes.

5. Les vecteurs quantité de mouvement sont presque identiques.

6. La vitesse du palet va augmenter si la masse de la crosse augmente.

7. a. Avant et après le choc, le vecteur quantité de mouvement du système {crosse + palet} reste le même.
b. Le vecteur quantité de mouvement d'un système au repos ou animé d'un mouvement rectiligne uniforme est constant, soit $\vec{p} = \overrightarrow{\text{constante}}$.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *Choisir un référentiel d'étude*

1 **1.** **c.**

2. **b** et **c.**

3. **a** et **d.**

2 **1.** Le mobile est soumis à l'action de la Terre et à l'action de la table sans frottement. Ces actions se compensent.

2. L'enregistrement 1, car le centre d'inertie du mobile est animé d'un mouvement rectiligne uniforme.

3. Le référentiel terrestre.

3 **1.** Il est immobile.

2. Il est circulaire uniforme. Il tourne dans le même sens et à la même vitesse que la Terre.

4 **1.** Quand sa vitesse est stable.

2. Dans la même phase du mouvement.

5 **1.** Dans le référentiel terrestre.

2. Son mouvement est approximativement circulaire uniforme.

3. a. Il verrait la Terre tourner sur elle-même.
b. Par analogie avec le référentiel terrestre, ce référentiel est dit « lunaire ».
c. Il serait lié au centre de la Lune.
d. Il tournerait sur une durée égale à celle de la période de rotation de la Lune sur elle-même.
e. Oui, car la durée du mouvement est inférieure à sa période de révolution.

6 **L'analemme**
En prenant chaque semaine exactement à la même heure et au même endroit la photo du Soleil pendant une année, on obtient ce cliché.
La trajectoire laissée par le Soleil au cours d'une année est appelée une analemme. Le déplacement apparent du Soleil est causé par le mouvement de la Terre autour du Soleil combinée avec l'inclinaison de l'axe de la Terre.

1. *Quel est le référentiel d'étude choisi ici ?*
Le référentiel terrestre.
2. *Quand le Soleil apparaît-il au point le plus haut de l'analemme ?*
Le Soleil est en haut de l'analemme en été.
3. *Quel jour de l'année est-il lorsque le Soleil est au point le plus bas de l'analemme ?*
Il est dans la position la plus basse le jour du solstice d'hiver.

COMPÉTENCE 2 : *Définir, reconnaître et caractériser des mouvements dans un référentiel d'étude*

7 **1.** **b**, **c** et **d.**

2. **b** et **d.**

3. **b.**

4. **b**, **c** et **d.**

8 **1.** Un repère d'espace orthonormé (O ; *x*, *y*) et un repère de temps.

2. Son vecteur position.

9 **1.** Elle augmente.

2. Il est rectiligne accéléré.

10 **1. a.** À $t = 0$ s, $x(0) = 3 \times 0 + 5 = 5$ m.
b. À $t = 3$ s, $x(3) = 3 \times 3 + 5 = 14$ m.

2. On peut calculer la vitesse moyenne entre $t = 3$ s et $t = 0$ s, on trouve $v = 9/3 = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; ou poser l'expression du nombre dérivé $v = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Le mouvement est rectiligne puisque sur un axe et uniforme car la vitesse est constante.

12 **1.** Les représentations a et d sont correctes. En b, le vecteur vitesse n'est pas dans le sens du mouvement. En c, le vecteur vitesse n'est pas sur la tangente à la trajectoire et le vecteur accélération n'est pas vers l'intérieur de la courbe.

2. Le mouvement a est rectiligne ralenti, car les deux vecteurs sont de sens opposés. En d, le mouvement est circulaire accéléré puisque l'angle entre les deux vecteurs est inférieur à 90°, le produit $\vec{v} \cdot \vec{a}$ est supérieur à 0.

COMPÉTENCE 3 : *Définir la quantité de mouvement, connaître et exploiter le principe d'inertie*

13 **1.** *Faux*. Le vecteur peut changer de sens et/ou de direction.

2. *Vrai*. Car $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.

3. *Faux*. Ces deux grandeurs ne s'expriment pas dans la même unité.

4. *Faux*. Le système a la même masse avant et après le saut. La vitesse devrait rester constante puisque le système est pseudo-isolé (en réalité, elle diminue à cause des frottements sur le sol).

5. *Faux*. Elle est soumise à des actions mécaniques gravitationnelles qui ne se compensent pas.

14 **1.** $p = 950 \times 13{,}9 = 1{,}32 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. $p = 1{,}67 \times 10^{-27} \times 3{,}00 \times 10^8$
$= 5{,}01 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

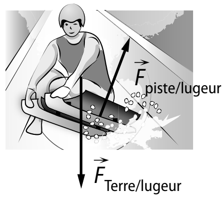
3. $p = 20 \times 1{,}0 = 20 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. $p = 73 \times 10^3 \times 50 = 3{,}7 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
Le classement est : 2, 3, 1 et 4.

15 **La quantité de mouvement**
Un canon tire un obus de 35,0 kg vers une cible. Cet obus se déplace avec une vitesse de 180 km · h⁻¹. Calculer la quantité de mouvement de l'obus exprimée dans une unité correcte.
$p = m \cdot v = 35{,}0 \times (180/3{,}6) = 1{,}75 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

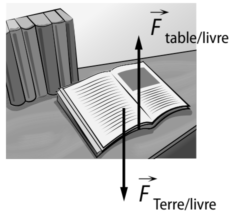
17 **1.** et **2.**

a.

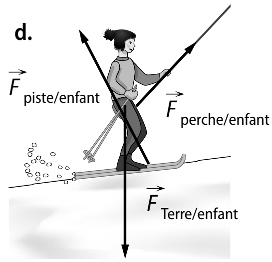


b. Aucune action mécanique si l'astéroïde est loin de tout astre.

c.



d.



3. Le système **b** est isolé puisqu'il n'est soumis à aucune action mécanique. Le système **c** est pseudo-isolé car les actions mécaniques se compensent puisqu'il est au repos. Le système **d** est pseudo-isolé car son mouvement est rectiligne uniforme, donc d'après le principe d'inertie les actions mécaniques se compensent. Le système **a** n'est ni isolé ni pseudo-isolé car il freine et les actions mécaniques ne se compensent pas.

4. Pour le système **c** qui est au repos, sa vitesse est nulle.

18 **1.** Tout objet persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les actions mécaniques qui s'exercent sur lui se compensent ou s'il n'est soumis à aucune action mécanique.

2. Pour le premier enregistrement.

3. La table est horizontale pour l'enregistrement 1, les deux actions mécaniques qui s'exercent sur le mobile se compensent. La table est inclinée pour l'enregistrement 2, les forces ne se compensent pas et la vitesse augmente.

4. Il est constant pour l'enregistrement 1, il augmente en valeur pour le 2. Dans les deux cas, sa direction est la trajectoire et son sens celui du mouvement.

19 **1.** L'action exercée par la Terre et l'action exercée par la piste sur le skieur.

2. Oui car les deux actions semblent se compenser. Dans ce cas par contre, cette représentation est incorrecte car la vitesse du skieur augmente, son mouvement n'est pas rectiligne uniforme.

3. L'action exercée par la piste sur le skieur est inclinée vers la droite.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

20 **1.** Le référentiel terrestre.

2. a. Rectiligne accéléré.
b. Rectiligne ralenti.
c. Circulaire accéléré.
d. Circulaire uniforme.

21 **1.** En mètre par seconde, la vitesse varie de 0 à 27,8 $m \cdot s^{-1}$. L'accélération est $a = 27{,}8/3{,}7 = 7{,}5\ m \cdot s^{-2}$.

2. Ils ont même sens : celui du mouvement, et même direction : la trajectoire.

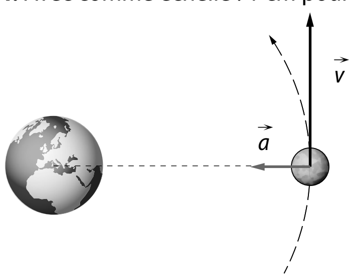
3. Non, car son mouvement est rectiligne uniformément accéléré par rapport au référentiel terrestre.

22 ⓐ correspond à ❷ ; ⓑ correspond à ❸ ; ⓒ correspond à ❹ ; ⓓ correspond à ❶.

23 **1.** Dans le référentiel géocentrique.

2. $v = \pi d/\text{durée d'un tour}$
$= \pi \times 2 \times 3{,}84 \times 10^8/(27{,}3 \times 24 \times 3\,600)$
$= 1{,}02 \times 10^3\ m \cdot s^{-1}$.

3. et **4.** Avec comme échelle : 1 cm pour 500 $m \cdot s^{-1}$.



5. a. Non car son mouvement est circulaire uniforme.
b. Elle se déplacerait selon un mouvement rectiligne uniforme dans l'espace et quitterait l'orbite terrestre.

24 **1. a.** La première équation permet d'écrire $t = \dfrac{x}{2}$, en substituant cette expression dans $y(t)$ on obtient $y(x) = 4\dfrac{x}{2} + 2 = 2x + 2$. C'est l'équation de la trajectoire.

b. L'équation $y = 2x + 2$ est celle d'une fonction affine. La trajectoire est donc rectiligne.

2. a. $v_x = \dfrac{dx}{dt} = 2\ m \cdot s^{-1}$ et $v_y = \dfrac{dy}{dt} = 4\ m \cdot s^{-1}$.

Le vecteur vitesse s'écrit dans le repère : $\vec{v} = 2\vec{i} + 4\vec{j}$.

Il est constant au cours du temps puisque ces coordonnées ne varient pas en fonction de t.

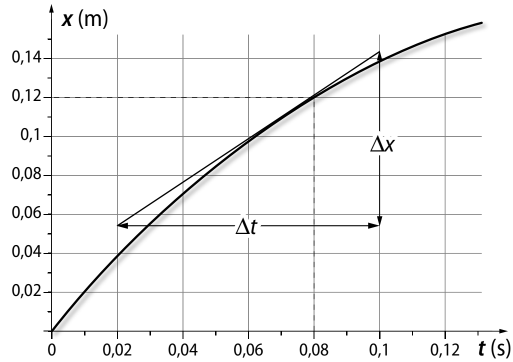
b. $v = \sqrt{2^2 + 4^2} \approx 4\ m \cdot s^{-1}$. Le mouvement est donc rectiligne uniforme.

3. a. Le vecteur quantité de mouvement est $\vec{p} = m \cdot \vec{v} = 0{,}2\vec{i} + 0{,}4\vec{j}$; il est également constant.

b. Si le référentiel d'étude choisi est galiléen, puisque $\vec{p}$ est un vecteur constant, le point matériel est considéré comme isolé ou pseudo-isolé.

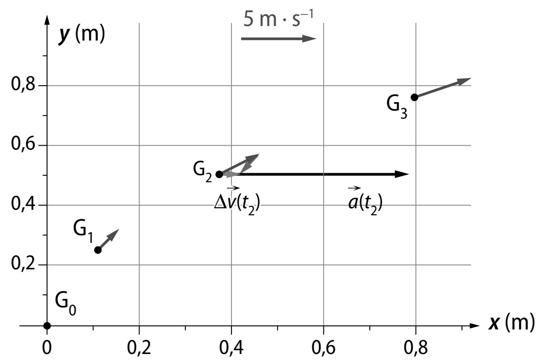
25 **1.** Il faut tracer la tangente au point considéré et calculer sa pente :

$$v = \Delta x/\Delta t = 0{,}085/0{,}08 = 1{,}1\ m \cdot s^{-1}.$$



2. Si on trace la tangente à $t = 0{,}02$ s et à $t = 0{,}1$ s, on constate que sa pente diminue, la vitesse va elle aussi diminuer.

26 **1. a.**



b. Le vecteur variation de vitesse a pour valeur 2,5 $m \cdot s^{-1}$.

2. a. $\Delta t = 0{,}250$ s, l'accélération est $a(t_2) = \Delta v/\Delta t = 10\ m \cdot s^{-2}$.
b. Le vecteur est tracé sur la figure à l'échelle 1 cm pour 4 $m \cdot s^{-2}$.

27 **1.** Car elles sont paramétrées par le temps.

2. À $t = 0$, $x(0) = 0$ et $y(0) = 0$.

3. a. $v_x(t) = \dfrac{dx(t)}{dt} = 8{,}00t + 6{,}00$

et $v_y(t) = \dfrac{dy(t)}{dt} = 3{,}00$.

b. À $t = 1{,}00$ s, $v_x(1{,}00) = 8{,}00 \times 1{,}00 + 6{,}00 = 14{,}0\ m \cdot s^{-1}$;
$v_y(1{,}00) = 3{,}00\ m \cdot s^{-1}$.

$v = \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2} = 14\ m \cdot s^{-1}$.

4. $a_x(t) = \dfrac{\mathrm{d}v_x(t)}{\mathrm{d}t} = 8{,}00\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

et $a_y(t) = \dfrac{\mathrm{d}v_y(t)}{\mathrm{d}t} = 0$.

La valeur de l'accélération est $a = 8{,}00\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

28 **1.** $v(3) = 8{,}75\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, $v(4) = 7{,}80\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ et $v(5) = 6{,}88\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

2. On peut choisir comme échelle 1 cm pour $2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

3. On trace le vecteur $\Delta\vec{v}(4) = \vec{v}(5) - \vec{v}(3)$ que l'on mesure, pour déterminer grâce à l'échelle sa norme qui vaut $1{,}87\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.
L'accélération est alors $a(4) = \Delta v(4)/2\tau = 23{,}3\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$. On prend comme échelle 1 cm pour $10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ par exemple.

4. Le produit est négatif, le mouvement est rectiligne ralenti.

29 **1.** Trajectoire curviligne (parabolique).

2. Au point G_2.

3. Il est constant.

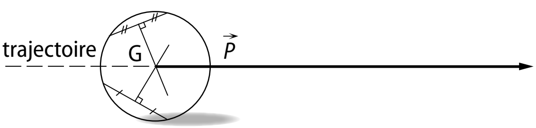
4. a. Autour de G_{10}, car les vecteurs vitesse et accélération sont perpendiculaires : $\vec{a} \cdot \vec{v} = 0$.

b. Avant G_{10} le mouvement est uniformément ralenti, après il est uniformément accéléré.

30 L'intersection de deux médiatrices d'une corde du cercle passe par G. La direction et le sens de $\vec{p}$ sont ceux du mouvement (flèche trajectoire).
La valeur de la quantité de mouvement est :

$$p = m \cdot v = 0{,}127 \times 3{,}94 = 5{,}00\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}.$$

On choisit comme échelle : 1 cm pour $1\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$.
Le vecteur mesure alors 5 cm.



31 **1.** Le référentiel terrestre, considéré comme galiléen car le mouvement est de courte durée.

2. Avant le choc, c'est la bille 2 qui a la plus grande vitesse car $p_1 < 2\,p_2$, soit :

$$2\,m_2 \cdot v_1 < 2\,m_2 \cdot v_2 \Rightarrow v_1 < v_2.$$

Après le choc, c'est l'inverse.

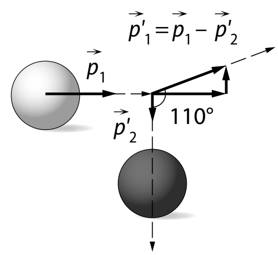
3. a. $\vec{p_1} > \vec{p_1'}$; $\vec{p_2} < \vec{p_2'}$; $\vec{p_1} + \vec{p_2} = \vec{p_1'} + \vec{p_2'}$ après construction graphique.

b. Seul le système {bille 1 + bille 2} est pseudo-isolé puisque le vecteur quantité de mouvement se conserve.

32 **1.** Le référentiel terrestre, considéré comme galiléen car le mouvement est de courte durée.

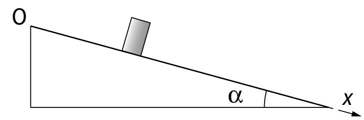
2. Le système formé par la boule blanche incidente et la boule rouge.

3. $p_1 = 0{,}209 \times 0{,}50 = 0{,}10\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$; $p_2 = 0\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$; $p_2' = 0{,}209 \times 0{,}20 = 0{,}042\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$.
Pour ce système, la somme des vecteurs quantité de mouvement avant et après le choc doit être la même. Soit $\vec{p_1} + \vec{p_2} = \vec{p_1'} + \vec{p_2'}$ avec $\vec{p_2} = \vec{0}$ puisque la boule rouge est au repos.
À l'échelle 1 cm pour $0{,}040\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$, on obtient la représentation graphique de $\vec{p_1'} = \vec{p_1} - \vec{p_2'}$.
En mesurant $\vec{p_1'}$ on obtient $p_1' = 0{,}10\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$. La vitesse de la boule blanche est donc $v_1' = p_1'/m = 0{,}50\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.



33 **1.** Dans le référentiel terrestre.

2.

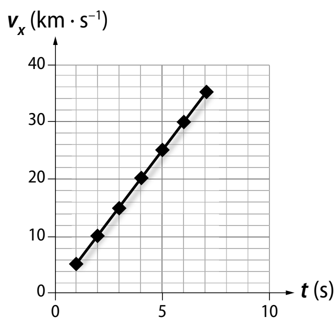


3. a. et **b.**
La formule est « =(D2-B2)/(D1-B1) »

c. La formule est « =(E3-C3)/(E1-C1) »

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	t (s)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
2	x (m)	0,000	2,500	10,00	22,50	40,00	62,50	90,00	122,5	160,0
3	v_x (m.s^{-1})		5,000	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	
4	a_x (m.s^{-2})			5,000	5,000	5,000	5,000	5,000		

4. a. et **b.** C'est une fonction linéaire, d'équation $v_x = 5{,}0t$.
La pente correspond à l'accélération. Ce mouvement peut être décrit par l'équation $v_x = a \cdot t$.



34 **1.** Le référentiel terrestre.

2. L'instant où le conducteur décide de freiner est pris comme origine du temps $t = 0$. Le point correspondant est l'origine du repère d'espace. On choisit un seul axe (Ox) pour étudier ce mouvement.

3. a. Pour calculer cette valeur, on utilise les deux valeurs de vitesse données que l'on convertit en m · s^{-1} pour une durée de 2,8 s :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\text{vitesse finale} - \text{vitesse initiale}}{2{,}8}$$
$$= \frac{0 - 14}{2{,}8} = -5{,}0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

b. Cette coordonnée de l'accélération sur l'axe (Ox) est négative, le vecteur accélération est donc opposé au sens du mouvement et à celui de la vitesse.
c. Le produit scalaire des deux vecteurs est négatif, le mouvement est ralenti.

4. a. Comme $a(t) = \frac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t}$, par intégration on obtient $v(t) = -5{,}0\ t +$ constante. Cette constante d'intégration est déterminée à l'origine, c'est-à-dire à $t = 0$.
On a $v(0)$ = constante = 14 m · s^{-1}. L'expression est donc $v(t) = -5{,}0\ t + 14$. On fait de même pour $x(t)$; $x(t) = -1/2 \times 5{,}0\ t^2 + 14\ t +$ constante. Cette constante est égale à $x(0) = 0$, et donc $x(t) = -1/2 \times 5{,}0\ t^2 + 14\ t$.
b. Calculons l'instant t correspondant à cette vitesse $v = 35/3{,}6 = 9{,}7$ m · s^{-1} ; $t = \frac{9{,}7 - 14}{-5{,}0} = 0{,}84$ s.

En reportant cette valeur dans l'expression $x(t)$, on a $x(0{,}84) = 9{,}9$ m. Quand la vitesse est de 35 km · h^{-1}, la distance n'est pas de 20 m mais de 9,9 m.

5. a. À la vitesse de 14 m · s^{-1}, cette distance est :

$$d = 14/1 = 14 \text{ m}.$$

b. La distance de freinage est donc de 26 – 14 = 12 m, et la durée de freinage est $\Delta t = 1{,}8$ s.
c. La coordonnée de l'accélération est :

$$a' = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0 - 14}{1{,}8} = -7{,}7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

d. $v'(t) = -7{,}7\ t + 14$
et $x'(t) = -1/2 \times 7{,}7\ t^2 + 14\ t + 14$.
e. Calculons l'instant t' où $v' = 9{,}7$ m · s^{-1} :

$$t' = \frac{9{,}7 - 14}{-7{,}7} = 0{,}54 \text{ s}.$$

La valeur de x' est 20 m.

SÉQUENCE 2

PARTIE 2

➙ Enseignement spécifique, p. 146

Champ de force et mouvement

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Deuxième loi de Newton : $\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$.	– Connaître et exploiter les trois lois de Newton ; les mettre en œuvre pour étudier des mouvements dans des champs de pesanteur et électrostatique uniformes. – *Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier un mouvement.*

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Connaître et exploiter la deuxième loi de Newton.

2. Étudier un mouvement dans un champ de pesanteur.

3. Étudier un mouvement dans un champ électrostatique.

Évaluation diagnostique *p. 146*

SITUATION 1

Il s'agit de la représentation ⓑ. Il est nécessaire de connaitre la résultante, c'est-à-dire la somme vectorielle des forces qui agissent sur un système afin d'appliquer la première ou la deuxième loi de Newton. L'**activité 1** permet de montrer le lien existant entre cette résultante des forces et la variation du vecteur quantité de mouvement d'un système en introduisant l'aspect vectoriel de la deuxième loi de Newton.

SITUATION 2

Les particules chargées sont accélérées à l'aide d'un champ électrostatique uniforme, créé à l'aide de deux armatures ou électrodes soumises à une tension électrique. Les accélérateurs électrostatiques sont linéaires, il est possible, en associant un champ magnétique, d'obtenir des accélérateurs circulaires qui permettent d'obtenir des particules d'énergie plus élevée.
L'étude du principe de fonctionnement d'un accélérateur linéaire est introduite dans l'**activité 2** où cette technique est utilisée pour déterminer la structure chimique superficielle des objets d'art au musée du Louvre.

SITUATION 3

La vitesse du javelot est bien sûr un des paramètres les plus importants pour réaliser un record de lancer, mais la direction donnée à ce projectile l'est tout autant. Cette direction, donnée par l'angle de tir α, influe sur la distance parcourue par le projectile. Si $\alpha = 45°$, le javelot lancé à une vitesse donnée ira plus loin que s'il est lancé avec un angle de tir différent.
Les caractéristiques des mouvements de projectiles lancés dans le champ de pesanteur terrestre, considéré comme uniforme, sont étudiées dans les **activités 3** et **4**.

ACTIVITÉS

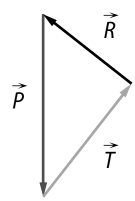
ACTIVITÉ 1

Le téléski *p. 148*

1. Dans un référentiel lié au sol, c'est-à-dire le référentiel terrestre.

2. La force $\vec{P}$, qui est le poids, modélise l'action de la Terre sur le système, $\vec{R}$ est l'action de la piste avec frottements et $\vec{T}$ celle de la perche sur le système.

3. a. La somme vectorielle est :

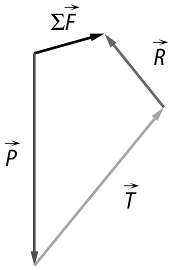


b. Elle est égale au vecteur nul : $\Sigma\vec{F} = \vec{0}$. Les actions mécaniques qui s'exercent sur le système se compensent.

c. Ce système est donc pseudo-isolé.

d. La première loi de Newton permet d'affirmer que le vecteur quantité de mouvement est constant. Son sens est celui du mouvement et sa direction est celle de la piste (même sens et même direction que le vecteur vitesse $\vec{v}$), son intensité est $p_1 = m \cdot v$.

4. a. Les forces $\vec{R}$ et $\vec{T}$ sont modifiées.
b. La résultante des forces $\Sigma\vec{F} = \vec{P} + \vec{T} + \vec{R}$ n'est pas nulle dans ce cas, ce vecteur a la direction de la piste et le sens du mouvement.



c. Le système ne peut plus être considéré comme pseudo-isolé, les actions mécaniques s'exerçant sur le système ne se compensant plus.
d. Le vecteur quantité de mouvement, même s'il conserve le même sens et la même direction, varie en intensité. Le vecteur quantité de mouvement sera plus grand ici puisque la vitesse du système augmente, le vecteur variation de quantité de mouvement $\Delta\vec{p}$ a la direction de la piste et il est dans le sens du mouvement.

5. Pendant la durée Δt, les vecteurs $\Delta\vec{p}$ et $\Sigma\vec{F}$ sont colinéaires.

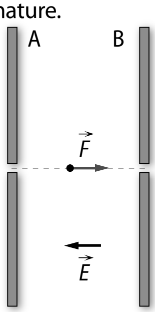
ACTIVITÉ 2

Un accélérateur linéaire *p. 149*

1. a. Le champ qui est utilisé ici est un champ électrostatique, en revanche le champ de pesanteur est négligé.
b. Les particules doivent porter une charge électrique q.

2. a. Ce sont les ions hydrure de formule H^-. L'armature B sera chargée positivement, les ions négatifs sont attirés par la force électrostatique liée au champ $\vec{E}$ vers cette armature.

b.



3. a. $E_c = |e| \cdot U_{AB} = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^6 = 3{,}2 \times 10^{-13}$ J
$= 2 \times 10^6$ eV $= 2$ MeV.
b. L'énergie cinétique d'une particule en mouvement est $E_c = 1/2\ m \cdot v^2$.

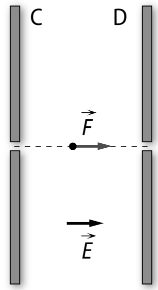
On a donc $v_B{}^2 = 2\,e \cdot U_{AB}/m$ et

$$v_B = \sqrt{\frac{2\,e \cdot U_{AB}}{m}} = 2 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. a. L'éplucheur enlève des électrons.
b. L'ion hydrure perd 2 électrons pour devenir un proton H^+.

5. a. Cette fois, l'armature positive est l'armature C, les ions hydrogènes positifs sont accélérés par la charge négative de l'armature D.

b.



6. a. Les protons arrivent en C à la vitesse v_C, puis, soumis à la tension U_{CD}, ils acquièrent alors l'énergie cinétique E_c qui leur permet d'obtenir en D une vitesse v_D supérieure à v_C.
b. Si $v_B = v_C$, alors la vitesse en D est supérieure à v_B et donc à v_A.

7. Les ions sont accélérés entre les armatures des deux condensateurs grâce à un champ électrostatique. Le mouvement est rectiligne, la trajectoire et la vitesse des charges ont la direction du champ électrostatique. Le terme accélérateur électrostatique linéaire ou rectiligne est totalement adapté.

ACTIVITÉ 3

Un record de saut en longueur *p. 150*

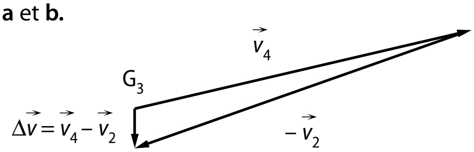
1. Le référentiel terrestre que l'on considère comme galiléen car la durée du mouvement est courte.

2. Elle est constante, la distance est approximativement la même entre deux positions successives de la voiture.

3. G possède un mouvement curviligne, la courbe formée est une parabole, le mouvement est parabolique.

4. On mesure l'écart sur le document entre G_3 et G_5, la distance réelle parcourue par la voiture est déterminée grâce à l'échelle fournie par la longueur de la voiture. On trouve une valeur de la vitesse $v = 38$ m $\cdot$ s^{-1}. Vitesse légèrement inférieure à celle indiquée par les commissaires le jour du saut.

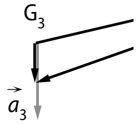
5. a et **b.**



c. On mesure le vecteur $\Delta\vec{v}$ et grâce à l'échelle de la vitesse on détermine sa valeur. On trouve $\Delta v = 4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. La valeur de l'accélération est :

$$a = \Delta v/(2\ \Delta t) = 4/(2 \times 0{,}2) = 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Après avoir tracé $\vec{a}$ qui a même sens et même direction que $\Delta\vec{v}$, on constate que $\vec{a}$ et $\vec{g}_0$ ont même sens, même direction et même intensité, on peut écrire : $\vec{a} = \vec{g}_0$.



d. Dans le repère choisi, $a_x = 0$ et $a_z = -g_0$.

6. a. $v_{0x} = v_0 \cdot \cos\alpha$
$v_{0z} = v_0 \cdot \sin\alpha$

b. et **c.** On trouve par intégration des coordonnées de l'accélération :

$v_x(t) = v_0 \cdot \cos\alpha \qquad x(t) = (v_0 \cdot \cos\alpha) \cdot t$
$v_z(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin\alpha$
$z(t) = -1/2\ g_0 \cdot t^2 + (v_0 \cdot \sin\alpha) \cdot t.$

7. $t = x/(v_0 \cdot \cos\alpha)$.
Reportons t dans l'expression $z(t)$:
$-1/2\ g_0 \cdot (x/(v_0 \cdot \cos\alpha))^2 + (v_0 \cdot \sin\alpha) \cdot (x/(v_0 \cdot \cos\alpha))$.
En simplifiant, on obtient :

$$z(x) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}\right)^2 + x \cdot \tan\alpha.$$

8. Si l'on veut modifier la distance parcourue, qui se nomme la portée, on pose $z(x) = 0$ qui correspond à une équation du second degré en x, dont les solutions seront zéro (le point de départ) et la portée. Cette portée dépend de deux paramètres qui sont α et v_0. Elle est maximale si $\alpha = 45°$ et elle augmente avec la vitesse initiale.
Pour battre ce record, il faut soit aller plus vite (ce qui est réalisable en modifiant la piste d'accélération), soit augmenter α, mais il faut alors tenir compte d'autres forces comme celle créée par l'air qui pourrait faire retourner la voiture pendant le saut.

ACTIVITÉ 4

Mouvement d'un projectile

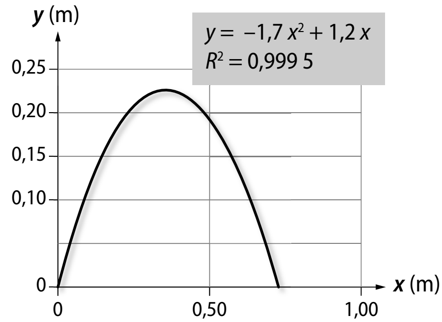
p. 151

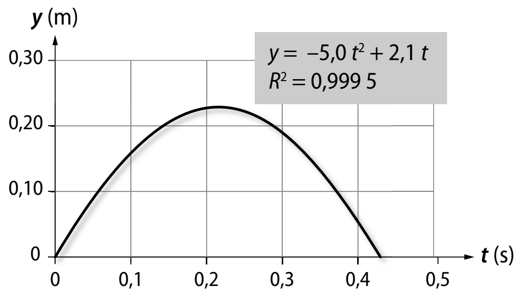
1. L'objectif de la webcam doit être perpendiculaire au plan du mouvement pour éviter toute déformation de l'image (erreur de parallaxe), et pour cadrer correctement le mouvement.

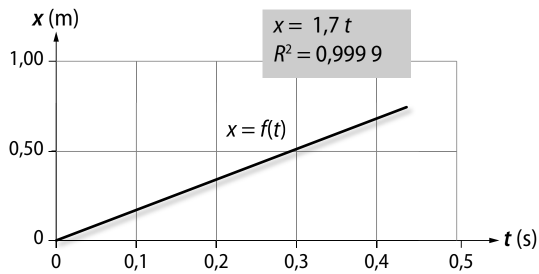
2. Il est nécessaire d'adapter la taille de l'image pour effectuer un pointage plus précis, puis d'étalonner l'écran à l'aide de la toise, de choisir le repère d'espace et l'origine des temps. Généralement, on associe à la première image étudiée l'origine des temps et l'origine du repère d'espace.

3. Le logiciel mesure pour chaque image les coordonnées du point dans le repère choisi, ici $x(t)$ et $y(t)$. Il indique donc également le temps t.

4. a. et **b.** À l'aide du tableur-grapheur utilisé, le coefficient de détermination affiché sous l'équation proposée est très proche de 1, le modèle retenu est adapté au mouvement réel.







5. $x(t) = 1{,}7\ t$ et $y(t) = -5{,}0\ t^2 + 2{,}1\ t$.

6. a. $v_x = 1{,}7$ et $v_y = -10\ t + 2{,}1$.

b. Pour les cellules suivantes, on peut proposer la formule suivante en D2 :

	A	B	C	D
1	t (s)	x (m)	y (m)	v_y(t)
2	0	0,00	0,00	= -10*A2 + 2,1

c. À $t = 0$, on a $v_x(0) = 1{,}7\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_y(0) = 2{,}1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

d. $v_0 = \sqrt{1{,}7^2 + 2{,}1^2} = 2{,}7\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\dfrac{v_0 \cdot \sin\alpha}{v_0 \cdot \cos\alpha} = \tan\alpha = 1{,}2$ soit $\alpha = \tan^{-1}(1{,}2) = 51°$.

7. a. $a_x = 0$ et $a_y = -\ 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$. Cette valeur est très proche de g_0, l'écart relatif entre ces deux valeurs est :

$$\frac{|g_0 - a|}{g_0} \times 100 = 2\ \%.$$

8. a. La trajectoire obtenue est une parabole, la chute peut être considérée comme libre, le projectile n'est soumis qu'au champ de pesanteur local g_0.

b. Il s'agit de l'action mécanique exercée par la Terre sur le projectile, qui est modélisée par son poids $\vec{P}$.

9. On a une accélération verticale, dirigée vers le bas, tout comme $\vec{g}_0$, puisque $a_x = 0$ et $a_y = -\ 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

De plus, $a \approx g_0$, on peut donc affirmer que $\vec{a} = \vec{g}_0$.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *Connaître et exploiter la deuxième loi de Newton*

1 **1.** **b.**

2. **a.**

3. **b** et **d.**

4. **a.**

2

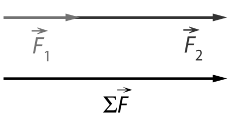
a b

La somme vectorielle est nulle en a, pas en b.

2. Dans la situation b.

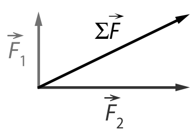
4 **La résultante des forces**

Tracer la résultante des forces sur les schémas suivants et déterminer son intensité.



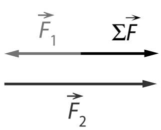
a

$\Sigma F = 15$ N



b

$\Sigma F = 11$ N



c

$\Sigma F = 5$ N

5 La deuxième loi de Newton nous permet d'écrire $m \cdot a = F$ avec F la force motrice du moteur.

On calcule $F = 2{,}5 \times 10^3 \times 1{,}5 = 3{,}8 \times 10^3$ N.

Si la masse du camion devient égale à 3,5 tonnes soit $3{,}5 \times 10^3$ kg, l'accélération a pour valeur :

$$a = 3{,}8 \times 10^3/(3{,}5 \times 10^3) = 1{,}1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

6 **1.** Le référentiel terrestre.

2. a. $\Delta p = m \cdot \Delta v = 200 \times (10 - 0) = 2\ 000\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. Le vecteur a la direction de la route et son sens est opposé à celui du mouvement puisque la vitesse diminue.

c. La deuxième loi de Newton puisque la quantité de mouvement varie.

d. Ce sont les mêmes que ceux de $\Delta\vec{p}$.

e. $\Sigma F = \Delta p/\Delta t = 1\ 000$ N.

COMPÉTENCE 2 : *Étudier un mouvement dans un champ de pesanteur*

7 **1.** **d.**

2. **a** et **b.**

3. **c.**

4. **b.**

8 **a.** Pour $\alpha = 0$, le mouvement est parabolique, le sommet de la parabole est en O.

b. La trajectoire est verticale, le mouvement est rectiligne uniformément varié.

c. Le mouvement est rectiligne uniformément accéléré.

9 **1.** La deuxième loi de Newton donne $\vec{a} = \vec{g}_0$.

2. Dans le repère choisi, la relation précédente donne $a_z = g_0$. Par intégrations successives et en déterminant les constantes d'intégration à l'aide des conditions initiales, on obtient :

$$v_z(t) = g_0 \cdot t \quad \text{puis} \quad z(t) = 1/2\ g_0 \cdot t^2.$$

3. Pour $z(t) = h$, on obtient $t = \sqrt{\dfrac{2h}{g_0}} = 0{,}45$ s.

4. À $t = 0{,}45$ s, $v_z(0{,}45) = 4{,}4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

10 **1.** On a toujours $a_z = g_0$, mais $v_z(t) = g_0 \cdot t - v_0$, l'expression de $z(t)$ devient $z(t) = 1/2\ g_0 \cdot t^2 - v_0 \cdot t$.

2. La hauteur est maximale quand $v_z(t) = 0$, soit $t = v_0/g_0$. En reportant cette expression dans $z(t)$, on obtient $z(t) = 1/2\ v_0^2/g_0 - v_0^2 \cdot g_0 = -\ 1/2\ v_0^2/g_0$.

La valeur est $z = -\ 0{,}46$ m, dans le repère choisi, soit une hauteur maximale $H = 1{,}5$ m au-dessus du niveau du sol.

11 **1.** $y(x) = -\dfrac{1}{2} g_0 \cdot \left(\dfrac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}\right)^2 + x \cdot \tan\alpha.$

2. Pour $y = 0$, $x = 72{,}28$ m dans le cas de ce lancer. En reportant ces valeurs dans l'équation de la trajectoire, on obtient $v_0 = 26{,}63\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. On cherche cette fois x pour $y = 0$. On remplace dans l'équation de la trajectoire g_0 par g_{0S} et on donne à v_0 la valeur trouvée en **2**.

On obtient l'équation $-0{,}016x^2 + x = 0$ qui admet deux solutions, $x = 0$ (le point de départ) et $x = 61{,}67$ m qui est la distance parcourue par le javelot sur Saturne.

12 **1.** $g_{0S} = G\dfrac{M_S}{R_S^2}$.

2. $g_{0S} = 6{,}67 \times 10^{-11} \times \dfrac{1{,}99 \times 10^{30}}{(6{,}96 \times 10^8)^2} = 274 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

G est en $m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$, R_S en m et M_S en kg, l'expression $G\dfrac{M_S}{R_S^2}$ s'exprime en $\dfrac{m^3 \cdot kg}{kg \cdot s^2 \cdot m^2} = \dfrac{m}{s^2} = m \cdot s^{-2}$.

3. $\dfrac{g_{0S}}{g_0} = 27{,}9$.

4. Sur Terre :

$$y(x) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}\right)^2 + x \cdot \tan\alpha$$
$$= -0{,}010\, x^2 + 0{,}58\, x.$$

Sur le Soleil :

$$y(x) = -\frac{1}{2} \times 27{,}9 \times g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}\right)^2 + x \cdot \tan\alpha$$
$$= -0{,}29\, x^2 + 0{,}58\, x.$$

5. Le calcul de la portée s'effectue en posant $y(x) = 0$. On obtient sur Terre l'équation $x(0{,}58 - 0{,}010\, x) = 0$ qui admet deux solutions, $x = 0$ (l'origine), et $x = 58$ m qui est la portée. Sur le Soleil, l'équation est $x(0{,}58 - 0{,}29\, x) = 0$, des deux solutions la portée est $x = 2{,}1$ m. On retrouve le rapport de 27,9 entre ces deux valeurs. La portée est plus faible sur le Soleil, la valeur du champ de pesanteur influe sur le mouvement de projectiles lancés dans les mêmes conditions.

COMPÉTENCE 3 : *Étudier un mouvement dans un champ électrostatique*

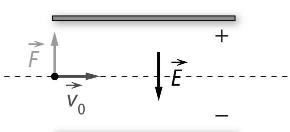
13 **1.** *Faux.* Le champ est vectoriel, il faut que le sens et la direction du vecteur restent constants.

2. *Vrai.*

3. *Faux.* Ces deux vecteurs sont colinéaires.

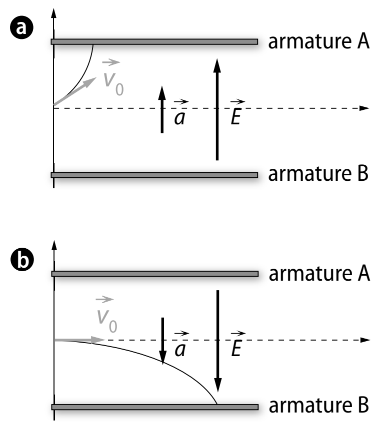
4. *Faux.* La masse apparaît dans l'équation de la trajectoire.

14



2. a. La force est verticale, orientée vers le haut.
b. Puisque la charge de l'électron est négative, le champ vertical est orienté vers le bas.
c. Le champ est orienté de l'armature chargée positivement vers l'armature chargée négativement.

15 **1.** et **2.**



16 **1.** $F = |-e| \cdot E = 1{,}6 \times 10^{-17}$ N.

2. $P = m \cdot g_0 = 8{,}9 \times 10^{-30}$ N.

3. $F = 1{,}8 \times 10^{12} \times P$, on peut dans ce cas négliger le poids par rapport à la force électrostatique.

17 **1. a.** La force électrostatique a même sens et même direction que $\vec{E}$, son intensité est $F = e \cdot E$.

b. $\dfrac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ soit $m \cdot \dfrac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} = e \cdot \vec{E}$.

En projetant cette relation sur l'axe (Ox), on a $a_x = e \cdot E/m$.

2. a. Les vecteurs $\vec{a}$ et $\vec{v}$ ont même sens et même direction, avec $\vec{a}$ vecteur constant. Le mouvement est rectiligne uniformément accéléré.
b. Le proton est accéléré uniformément sur une trajectoire rectiligne, le dispositif est donc bien un accélérateur rectiligne ou linéaire.

3. $v(t) = a_x \cdot t + \text{constante} = (e \cdot E/m) \cdot t + v_0$
et $x(t) = 1/2\ (e \cdot E/m) \cdot t^2 + v_0 \cdot t$.

4. a. $v_x(t) = v_f = 2\, v_0 = (e \cdot E/m) \cdot t + v_0$
soit $t = (m.\, v_0)/(e \cdot E) = 2{,}1 \times 10^{-8}$ s.
b. Pour cette valeur de t, on trouve :
$$x(2{,}1 \times 10^{-8}) = 6{,}3 \times 10^{-5} \text{ m}.$$

18 **1. a.** La trajectoire a pour équation :

$$y(x) = -1/2 \cdot \frac{e \cdot E}{m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \cdot x^2 + x \cdot \tan\alpha.$$

b. Il s'agit d'une parabole.

2. a. Les coordonnées du point C sont $x_C = \ell$ et $y_C = 0$. En utilisant ces coordonnées, l'équation de la trajectoire devient :

$$0 = -\frac{e \cdot E}{2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \cdot \ell^2 + \ell \cdot \tan\alpha$$

soit $$\frac{e \cdot E}{2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2\alpha} \cdot \ell^2 = \ell \cdot \tan\alpha.$$

Puis $e \cdot E \cdot \ell = 2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \tan\alpha$
$= 2\,m \cdot v_0^2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha = m \cdot v_0^2 \cdot \sin 2\alpha$.

Soit $\sin 2\alpha = \dfrac{e \cdot E \cdot \ell}{m \cdot v_0^2}$

b. $\alpha = 6{,}0°$.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

19 **1.** À $t = 0$, $y(0) = 1{,}00$ m.

2. $v_x(t) = -8{,}00t + 6{,}00$ et $v_y(t) = 3{,}00 = v_y$.

3. $v_{0x} = 6{,}00\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_{0y} = 3{,}00\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
la valeur de la vitesse est $v_0 = 6{,}70\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. $v_{0y}/v_{0x} = v_0 \cdot \sin\alpha/(v_0 \cdot \cos\alpha) = \tan\alpha$, donc :
$\alpha = \tan^{-1}(3{,}00/6{,}00) = 26{,}0°$.

5. $a_x = -8{,}00\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ et $a_y = 0{,}00$. Le vecteur accélération est donc vertical, orienté dans le sens opposé à (O*y*), soit vers le bas. Son intensité est $a = \sqrt{a_x^2} = 8{,}00\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

6. Le vecteur $\Sigma\vec{F}$ a même sens et même direction que le vecteur accélération.
Son intensité est $\Sigma F = a/m = 8{,}00/0{,}250 = 32{,}0$ N.

20 **1.** L'action de la Terre, modélisée par son poids $\vec{P}$.

2. $P = m \cdot g_0 = \rho_v \cdot V \cdot g_0 = \rho_v \times 4/3 \times \pi \cdot r^3 \cdot g_0$
$= 1{,}0 \times 10^{-1}$ N
$P_A = \rho_{air} \cdot V \cdot g_0 = \rho_{air} \times 4/3 \times \pi \cdot r^3 \cdot g_0 = 5{,}3 \times 10^{-5}$ N.

3. La poussée d'Archimède est 1 923 fois plus petite que le poids, on peut donc la négliger.

4. Un ballon de baudruche gonflé à l'aide d'un gaz très léger comme l'hélium par exemple.

21 **1.** Le référentiel terrestre considéré comme galiléen.

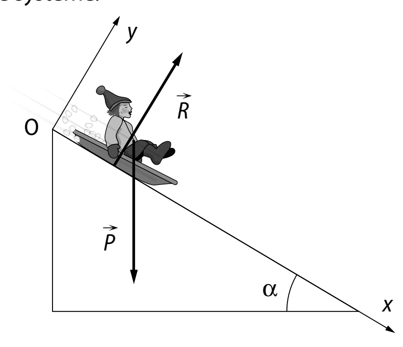
2. Graphiquement à $t = 0$, la vitesse est $v_0 = 2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. a. L'accélérateur est le coefficient directeur de la courbe. $a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t} = \dfrac{(3-2)}{(1-0)} = 1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. La direction de l'accélération est parallèle à la piste, et son sens est celui du mouvement, puisque la vitesse augmente. Les coordonnées de l'accélération sont (a ; 0).

4. a. L'action de la Terre modélisée par le vecteur $\vec{P} = m \cdot \vec{g}_0$ et l'action de la piste modélisée par la force $\vec{R}$ sur le système.

b.



5. a. D'après la deuxième loi de Newton : $\vec{P} + \vec{R} = m \cdot \vec{a}_G$

b. Sur (O*x*) on a l'équation :
$m \cdot g_0 \cdot \sin\alpha + 0 = m \cdot a = m$
et sur (O*y*) l'équation : $m \cdot g_0 \cdot \cos\alpha + R = 0$.

c. Comme R est inconnue, on utilise $m \cdot g_0 \cdot \sin\alpha = m$ et donc $\sin\alpha = 1/g_0$, soit $\alpha = \sin^{-1}(1/g_0) = 6°$.

22 **1. a.** Rectiligne uniformément ralenti.

b. $a = \Delta v/\Delta t = (3{,}0 - 0)/(3{,}0 - 0) = 1{,}0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

2. a. La deuxième loi de Newton permet d'écrire $\Sigma\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. La résultante des forces est de même sens que l'accélération, c'est-à-dire opposé au sens du mouvement, et a pour direction la portion de droite entre le point de départ de la balle et le trou. Sa valeur est :
$\Sigma F = m \cdot a = 0{,}046$ N.

b. Cette résultante des forces modélise les frottements entre le green et la balle.

23 **1.** Le référentiel terrestre considéré comme galiléen.

2. Un repère constitué d'un axe vertical (O*z*) orienté vers le haut, dont l'origine correspond au point où la balle est lancée.

3. $\Sigma\vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{P} = m \cdot \vec{g}_0$.

a. $a_z = -g_0$.

b. $v_z(t) = -g_0 \cdot t + v_0$ et $z(t) = -1/2 \cdot g_0 \cdot t^2 + v_0 \cdot t$.

4. Quand $z(t) = h$, $v_z(t) = 0$, on peut alors déduire $t = v_0/g_0$ et en reportant cette expression dans $z(t)$ on obtient :
$z(t) = 1/2\ v_0^2/g_0 = h$.

On calcule $v_0 = \sqrt{\dfrac{2h}{g_0}} = 2{,}0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. La durée totale du mouvement est $2\,t = 2\,v_0/g_0$, on a :
$t = 0{,}41$ s.

24 **1.** Le projectile est soumis uniquement à son poids. D'après la deuxième loi de Newton :
$m \cdot \vec{g}_0 = m \cdot \vec{a}$ et donc $\vec{g}_0 = \vec{a}$.

Le vecteur accélération $\vec{a}$ du centre d'inertie G du projectile ne dépend pas des conditions initiales. L'affirmation est vraie.

2. Comme $\vec{g}_0 = \vec{a}$, la projection suivant l'axe vertical (O*z*) donne $a_z = -g_0$.
Soit $v_z(t) = -g_0 \cdot t + v_{0z} = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin\alpha$, v_z varie au cours du temps, le mouvement du projeté de G suivant l'axe vertical (O*z*) n'est pas uniforme. L'affirmation est fausse.

3. L'équation de la trajectoire de G est :

$$z = -\frac{1}{2}\,g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos\alpha}\right)^2 + x \cdot \tan\alpha.$$

Le mouvement est parabolique sauf pour $\alpha = 90°$. L'affirmation est fausse.

4. Les coordonnées du vecteur position avec $\alpha = 0$ sont :

$$\overrightarrow{OG}\begin{cases} x = v_0 \cdot t \\ z = -\dfrac{1}{2} \cdot g_0 \cdot t^2 \end{cases}$$

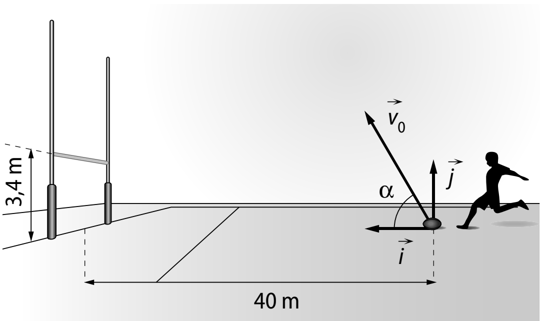
Lorsque $z = -H$, alors le projectile touche le sol, ceci a lieu à l'instant noté t_S.

$-H = -\dfrac{1}{2} \cdot g_0 \cdot t_S^2$, soit $t_S^2 = \dfrac{2H}{g_0}$ et donc $t_S = \sqrt{\dfrac{2H}{g_0}}$.

On calcule alors l'abscisse x à cet instant :

$x = v_0 \cdot t_S = v_0 \cdot \sqrt{\dfrac{2H}{g_0}}$. L'affirmation est vraie.

25 1.



2. Sur l'axe des abscisses : $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$.
Sur l'axe des ordonnées : $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$.

3. D'après la deuxième loi de Newton $m \cdot \vec{a}_G = m \cdot \vec{g}_0$ soit $\vec{a}_G = \vec{g}_0$. Les coordonnées du vecteur accélération sont donc $a_x = 0$ et $a_y = -g_0$.

4. Par intégration, on obtient $v_x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha$ et $v_y(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha$. De même $x(t) = (v_0 \cdot \cos \alpha) \cdot t$ et $y(t) = -1/2\, g_0 \cdot t^2 + (v_0 \cdot \sin \alpha) \cdot t$.

5. En éliminant le temps t des expressions $x(t)$ et $y(t)$, on obtient $y(x) = -\dfrac{1}{2} \cdot g_0 \cdot \left(\dfrac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha}\right)^2 + x \cdot \tan \alpha$.

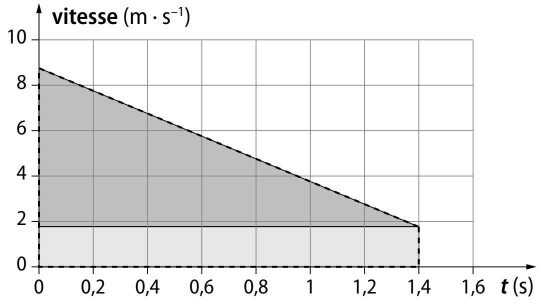
6. Pour $x = 40$ m et $y = 3{,}4$ m, la transformation est réussie si $y(40) \geqslant 3{,}4$ m. On obtient après résolution de cette inéquation : $v_0 \geqslant 21{,}1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. La valeur minimale est donc $v_{0\,\text{min}} = 21{,}1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

7. Il lui faut taper le ballon plus horizontalement afin d'obtenir un angle voisin de 45°.

26 1. a. $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$ et $v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha$.
b. $v_{0x} = 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_{0y} = 8{,}7\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ soit $v_0 = 13{,}3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
$v_{0y}/v_{0x} = v_0 \cdot \sin \alpha / v_0 \cdot \cos \alpha = \tan \alpha$, et donc :

$$\alpha = \tan^{-1}(8{,}7/10) = 41°.$$

2. a. b. L'aire A_1 sous la courbe $v_x(t)$ est celle d'un rectangle $A_1 = 10 \times 1{,}4 = 14\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{s} = 14$ m.
L'aire A_2 sous la courbe $v_z(t)$ est la somme de la surface du triangle rectangle gris foncé et du rectangle gris clair.



$A_2 = 1{,}8 \times 1{,}4 + 1/2 \times (8{,}7 - 1{,}8) \times 1{,}4$
$= 7{,}35\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{s} = 7{,}35$ m.

c. Ces aires correspondent respectivement aux déplacements $x(t)$ et $z(t)$ pour $t = 1{,}4$ s.

27 1. Le champ est dirigé vers l'armature chargée négativement, il est perpendiculaire aux armatures, son intensité est constante.

2. a. La deuxième loi de Newton permet d'écrire $\dfrac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$

soit $m \cdot \dfrac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} = -e \cdot \vec{E}_1$.

En projetant cette relation sur (Ox_1), on a :

$$a_{x1} = -e \cdot (-E_1)/m.$$

Par intégration, on détermine :

$$v_1(t) = \frac{e \cdot E_1}{m} t \quad \text{et} \quad x_1(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot E_1}{m} t^2.$$

b. et **c.** L'électron arrive en B à l'instant t, tel que :

$$t = m \cdot v_1 / (e \cdot E_1).$$

on a alors $x_1(t) = \dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{e \cdot E_1}{m} \left(\dfrac{m \cdot v_1}{e \cdot E_1}\right)^2 = \dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{m \cdot v_1^2}{e \cdot E_1} = d_{AB}$.

On a donc $v_1^2 = \dfrac{2\,e \cdot E_1 \cdot d_{AB}}{m} = \dfrac{2\,e \cdot U_{AB}}{m}$

soit $v_1 = \sqrt{\dfrac{2\,e \cdot U_{AB}}{m}}$.

Le calcul donne $v_1^2 = 2 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 18 \times 10^2 / (9 \times 10^{-31})$
$= 2 \times 1{,}6 \times 2 \times 10^{-17}/10^{-31}$
$= 6{,}4 \times 10^{14}\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Puis $v_1 = 2{,}5 \times 10^7\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. La deuxième loi de Newton permet d'écrire :

$$m \cdot \vec{a} = -e \cdot \vec{E}_2.$$

Comme précédemment, on détermine :

$$v_{2x} = v_1 \text{ et } v_{2z} = \frac{e \cdot E_2}{m} t.$$

Puis $x_2(t) = v_1 \cdot t$ et $z_2(t) = \dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{e \cdot E_2}{m} t^2$.

L'équation de la trajectoire s'obtient en posant $t = x_2/v_1$ et en reportant cette expression dans $z_2(t)$. On obtient :

$$z(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot E_2}{m} \left(\frac{x_2}{v_1}\right)^2.$$

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

28 **1.** La chute étant supposée libre, le grêlon n'est soumis qu'à son propre poids, la deuxième loi de Newton donne $m \cdot \vec{g}_0 = m \cdot \vec{a}$ soit $\vec{g}_0 = \vec{a}$.

En projetant sur l'axe (Oz), on obtient $a_z = g_0$.
Par intégration, on obtient $v_z(t) = g_0 \cdot t + v_{0z}$ avec $v_{0z} = 0$ m · s^{-1} et donc $v_z(t) = g_0 \cdot t$.
De même par intégration, on obtient $z(t) = 1/2\, g_0 \cdot t^2 + z_0$ avec à $t = 0$, $z_0 = 0$ m, d'où $z(t) = 1/2\, g_0 \cdot t^2$.

2. Soit t_S l'instant où le grêlon touche le sol, on a :

$$z(t_S) = h = 1/2\, g_0 \cdot t_S^2,\ \text{soit } t_S = \sqrt{\frac{2h}{g_0}}.$$

Reportons cette expression dans :

$v_z(t_S) = g_0 \cdot t_S = g_0 \cdot \sqrt{\dfrac{2h}{g_0}}$, on obtient :

$v_z(t_S) = \sqrt{2\,h \cdot g_0} = \sqrt{2 \times 9{,}80 \times 1500} = 171$ m · s^{-1} soit 617 km · h^{-1}, valeur supérieure aux 160 km · h^{-1} donnés dans le texte, cette valeur n'est donc pas vraisemblable.

3. $[K] = \dfrac{[F]}{[v^2]} = \dfrac{\mathrm{M \cdot L \cdot T^{-2}}}{\mathrm{L^2 \cdot T^{-2}}} = \mathrm{M \cdot L^{-1}}$, K s'exprime donc en kg · m^{-1} .

4. $P_A = \rho \cdot V \cdot g_0 = \rho \cdot \dfrac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot g_0$

$$= \frac{4}{3}\pi \times \left(\frac{3{,}0}{2} \times 10^{-2}\right)^3 \times 1{,}3 \times 9{,}80 = 1{,}8 \times 10^{-4}\ \text{N}.$$

$P = m \cdot g_0 = 13 \times 10^{-3} \times 9{,}80 = 0{,}13$ N, ce poids est bien plus élevé que la valeur de la poussée d'Archimède, que l'on peut négliger.

5. a. La deuxième loi de Newton donne $\vec{P} + \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

Cette relation projetée sur l'axe (Oz) devient :

$$P - F = m \cdot a_z,\ \text{soit } m \cdot \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = m \cdot g_o - K \cdot v^2.$$

Cette équation peut s'écrire : $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = g_0 - \dfrac{K}{m} \cdot v^2$

qui est de la forme $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \mathrm{A} - \mathrm{B} \cdot v^2$.

b. De l'expression précédente, on a à un instant t_i :

$$a(t_i) = \mathrm{A} - \mathrm{B} \cdot v(t_i)^2.$$

On peut donc calculer :

$$a(t_4) = \mathrm{A} - \mathrm{B} \cdot v(t_4)^2 = 9{,}80 - 1{,}56 \times 10^{-2} \times 17{,}2^2$$
$$= 5{,}18\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Comme $a = \Delta v/\Delta t$, la vitesse à un instant t_{i+1} peut s'écrire :

$$v(t_{i+1}) = v(t_i) + a(t_i) \cdot \Delta t.$$

On a donc $v(t_5) = v(t_4) + a(t_4) \cdot \Delta t = 17{,}2 + 5{,}18 \times 0{,}5$
$= 19{,}8$ m · s^{-1}.

c. Quand la vitesse limite est atteinte, on a :

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = 0 = \mathrm{A} - \mathrm{B} \cdot v_{\lim}^2,$$

soit $v_{\lim} = \sqrt{\dfrac{\mathrm{A}}{\mathrm{B}}} = \sqrt{\dfrac{9{,}80}{1{,}56 \times 10^{-2}}} = 25$ m · s^{-1}, valeur bien plus proche de la vitesse réelle des grêlons.

SÉQUENCE 3

PARTIE 2

➝ Enseignement spécifique, p. 164

Mouvement dans l'espace

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Principe des actions réciproques. – Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé.	– *Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour interpréter un mode de propulsion par réaction à l'aide d'un bilan qualitatif de quantité de mouvement.*
– Mouvement d'un satellite. – Révolution de la Terre autour du Soleil.	– Démontrer que, dans l'approximation des trajectoires circulaires, le mouvement d'un satellite, d'une planète, est uniforme. Établir l'expression de sa vitesse et de sa période.
– Lois de Kepler.	– Connaître les trois lois de Kepler ; exploiter la troisième dans le cas d'un mouvement circulaire.

Les compétences à acquérir dans la séquence
1. Interpréter un mode de propulsion par réaction.
2. Décrire les caractéristiques du mouvement d'une planète ou d'un satellite.
3. Connaître les lois de Kepler et exploiter la troisième.

Évaluation diagnostique *p. 164*

SITUATION 1
Cette situation permet d'introduire le principe des actions réciproques sur un exemple simple que les élèves connaissent bien. Lorsqu'on alimente en eau l'arroseur tourniquet, il va se mettre à tourner sur lui-même. En effet, lorsque ce tourniquet est alimenté, il exerce une action sur l'eau qu'il expulse, il existe alors une action de l'eau sur le tourniquet qui provoque sa rotation dans le sens opposé aux jets d'eau.
Le même raisonnement est demandé aux élèves au début de l'**activité 1** afin d'interpréter un mode de propulsion par réaction.

SITUATION 2
Il s'agit de vérifier que les élèves connaissent bien la loi de la gravitation universelle. En effet, c'est la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur la Lune qui permet d'expliquer son mouvement.
Dans l'**activité 2**, les élèves vont retrouver cette loi dans un texte de Voltaire.

SITUATION 3
Cette situation permet de traquer les idées fausses concernant le mouvement des planètes autour du Soleil. En effet, l'orbite de ces planètes n'est pas circulaire mais elliptique et leurs vitesses de rotation autour du Soleil n'est pas constante.
Les élèves pourront découvrir cela dans l'**activité 2** avec les exemples de la Terre et de Neptune ainsi que dans l'**activité 3** avec les énoncés des trois lois de Kepler. Ils découvriront également à quelle condition on peut se placer dans l'approximation des trajectoires circulaires.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1
Mode de propulsion par réaction *p. 166*

1. a. Il suffit qu'une personne gonfle ce ballon, le ferme puis le lâche en laissant l'air intérieur s'échapper dans la salle.

2. Ce ballon n'a pas besoin de l'air de la salle pour voler mais uniquement de l'air qui est à l'intérieur du ballon. Il pourrait donc voler dans le vide.

3. On peut alors assimiler le ballon de baudruche au corps de la fusée et l'air qu'il contient au mélange combustible + comburant que contient la fusée.

4. À $t = 0$, on a $\vec{p}_{(S)}(t=0) = m_0 \cdot \vec{0} = \vec{0}$.

5. a. À l'instant t, on a :

$$\vec{p}_{(S)}(t) = \vec{p}_{(\text{gaz éjectés})}(t) + \vec{p}_{(\text{fusée})}(t).$$

b. Comme le système (S) est isolé, sa quantité de mouvement se conserve, donc $\vec{p}_{(S)}(t=0) = \vec{p}_{(S)}(t)$ donc

$\vec{0} = m_g \cdot \vec{v}_g + m_f \cdot \vec{v}_f$, soit $\vec{v}_f = -\dfrac{m_g \cdot \vec{v}_g}{m_f}$.

6. La vitesse de la fusée dépend uniquement de la vitesse des gaz expulsés, de leur masse et de la masse de la fusée. Les gaz expulsés par la fusée sont donc à l'origine de son mouvement : c'est le mode propulsion par réaction.

ACTIVITÉ 2

Mouvement d'une planète *p. 167*

1. a. La loi de la gravitation a été découverte par Isaac Newton (1643-1727).

b. On trouve dans le texte : «…c'est la gravitation qui le fait tourner autour de ce centre… ». En effet, c'est l'action mécanique exercée par le Soleil sur la planète qui permet d'expliquer son mouvement.

2. On trouve dans le texte : « Un corps se mouvant autour d'un centre pèse donc en raison inverse du carré de sa distance actuelle au centre, comme aussi en raison directe de sa masse… ». On a ainsi $F_{S/T} = \dfrac{G \cdot m_S \cdot m_T}{d_{ST}^2}$

avec $F_{S/T}$ en Newton (N) ; G la constante de gravitation universelle : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$ (ou $N \cdot kg^{-2} \cdot m^2$) ; m_S et m_T les masses du Soleil et de la Terre en kilogramme (kg) et d_{ST} la distance entre le centre du Soleil et le centre de la Terre en mètre (m).

3. a. On trouve dans le texte : «…sans cette gravitation, il s'en éloignerait en décrivant une tangente. ». Sans cette action mécanique, la Terre quitterait le système solaire en suivant une trajectoire rectiligne.

b. Si la Terre ne subissait plus d'interaction gravitationnelle, alors elle ne serait soumise à aucune action mécanique, le principe d'inertie serait donc bien vérifié et le mouvement de la Terre serait rectiligne uniforme.

4. On trouve dans le texte : «…plus ce mobile sera éloigné, plus il tournera lentement… », et comme Neptune est plus éloignée du Soleil que la Terre, alors Neptune tourne moins vite que la Terre autour du Soleil.

5. a. Lorsque $e = 0$, on a $c = 0$ et donc les points O, F et F′ sont confondus. L'ellipse devient donc un cercle de centre C = O et de rayon $r = a$.

b. Les excentricités de la Terre et de Neptune sont très faibles, on peut donc considérer que leurs orbites sont des cercles. Cela constitue l'approximation des trajectoires circulaires.

6. a. Ces planètes décrivent alors des cercles de circonférence $2\pi r$ (avec $r = a$) pendant une durée T à la vitesse v, on a donc $v = \dfrac{2\pi r}{T}$, d'où :

$$v_T = \frac{2 \times \pi \times 150 \times 10^6}{1{,}00 \times 365{,}25 \times 24 \times 3\,600} = 29{,}9\ km \cdot s^{-1} ;$$

$$v_N = \frac{2 \times \pi \times 4\,488 \times 10^6}{165 \times 365{,}25 \times 24 \times 3\,600} = 5{,}42\ km \cdot s^{-1}.$$

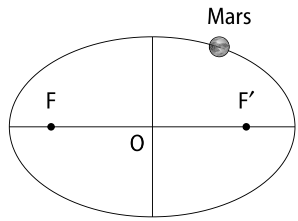
b. Ces valeurs sont bien cohérentes avec la réponse de la question **4** puisque $v_N < v_T$.

7. La vitesse v d'une planète diminue lorsque r augmente, donc elle ne peut pas être proportionnelle à $\sqrt{r}$ ni à r. De plus, on a $\dfrac{v_T}{v_N} = \dfrac{29{,}9}{5{,}42} = 5{,}52$. Or on constate que $\sqrt{\dfrac{r_N}{r_T}} = \sqrt{\dfrac{4\,488}{150}} = 5{,}47$. On en conclut que la vitesse d'une planète en orbite autour du Soleil est proportionnelle à $\dfrac{1}{\sqrt{r}}$.

ACTIVITÉ 3

Les lois de Kepler *p. 168*

1. a.



b. D'après le document 1 :

– Première loi : l'orbite d'une planète du système solaire est elliptique et le Soleil occupe un des foyers de l'ellipse.

– Deuxième loi : les aires balayées en des temps égaux par la droite joignant la planète au Soleil sont égales.

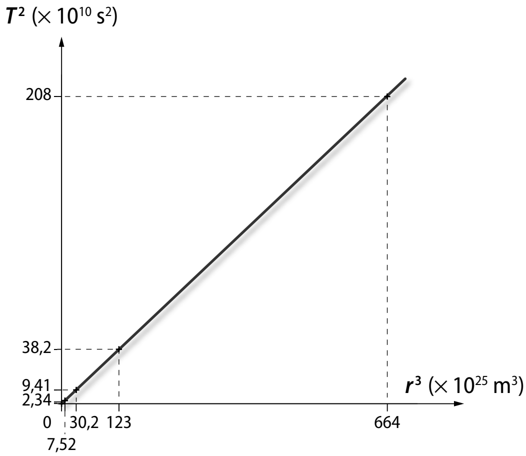
– Troisième loi : le carré de la période de révolution des planètes est proportionnel au cube de leur distance moyenne au Soleil.

c. On peut en déduire que la vitesse d'une planète n'est pas constante sur son orbite, elle augmente lorsque la planète se rapproche du Soleil et diminue lorsqu'elle s'en éloigne.

2. a. Dans le cas des lunes galiléennes, l'astre attracteur est Jupiter.

b. Troisième loi appliquée aux lunes galiléennes : le carré de la période de révolution des lunes Galiléennes est proportionnel au cube de leur distance à Jupiter (rayon de l'orbite quasi circulaire).

3. a. On peut utiliser l'échelle suivante : en abscisse : 1 cm pour $20{,}0 \times 10^{10}\ s^2$ et en ordonnée : 1 cm pour $60{,}0 \times 10^{25}\ m^3$.



b. Les points sont alignés suivant une droite, la troisième loi de Kepler est donc bien vérifiée : le carré de la période de révolution des lunes galiléennes est proportionnel au cube de leur distance à Jupiter.

4. D'après les lois de Kepler :
– les trajectoires des planètes et des satellites sont des ellipses dont l'astre attracteur est l'un des foyers ;
– la vitesse des planètes et des satellites n'est pas constante, elle augmente lorsque la planète ou le satellite se rapproche du Soleil et diminue lorsqu'il s'en éloigne ;
– le carré de la période de révolution des planètes et des satellites est proportionnel au cube de leur distance moyenne à l'astre attracteur.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *Interpréter un mode de propulsion par réaction*

1 **1.** **a** et **b.**

2. **b** et **c.**

3. **a** et **c.**

4. **b** et **c.**

2 **1.** Les deux forces sont :
– la force exercée par la Terre sur le livre (origine : centre d'inertie du livre ; direction : verticale ; sens : vers le bas ; intensité : $F_{\text{Terre/livre}} = P = 8{,}2$ N) ;
– la force exercée par la table sur le livre (origine : centre d'inertie du livre ; direction : verticale ; sens : vers le haut ; intensité : $F_{\text{table/livre}} = F_{\text{Terre/livre}} = 8{,}2$ N).

2. D'après le principe des actions réciproques, ce livre exerce une action mécanique sur la table, modélisée par une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé à celle qui modélise l'action mécanique qu'exerce la table sur le livre.

Les caractéristiques de cette force sont les suivantes : origine : centre d'inertie du livre ; direction : verticale ; sens : vers le bas ; intensité :

$$F_{\text{livre/table}} = F_{\text{table/livre}} = 8{,}2 \text{ N.}$$

3 Les valeurs indiquées sont identiques (environ 2 N). D'après le principe des actions réciproques, le dynamomètre (D_1) exerce une action mécanique sur le dynamomètre (D_2) modélisée par une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé à celle qui modélise l'action mécanique qu'exerce le dynamomètre (D_2) sur le dynamomètre (D_1). Donc $F_{D_1/D_2} = F_{D_2/D_1}$.

4 **1. a.** Après le lancer, Louisa et son canoë vont se déplacer dans le sens opposé à la pierre.
b. D'après le principe des actions réciproques, Louisa exerce une action mécanique sur la pierre modélisée par une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé à celle qui modélise l'action mécanique qu'exerce la pierre sur Louisa. C'est cette dernière action mécanique qui est responsable du mouvement de Louisa et de son canoë.

2. a. Avant le lancer, le système (S) est un système pseudo-isolé car les actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur lui se compensent.
b. On a $\vec{p}_{\text{avant}}(S) = (m_L + m_C + m_P) \cdot \vec{0} = \vec{0}$.
3. a. On a $\vec{p}_{\text{après}}(S) = (m_L + m_C) \cdot \vec{v} + m_P \cdot \vec{v}_P$. Comme le système (S) est pseudo-isolé, sa quantité de mouvement se conserve, on a $\vec{p}_{\text{avant}}(S) = \vec{p}_{\text{après}}(S)$,

donc $$\vec{0} = (m_L + m_C) \cdot \vec{v} + m_P \cdot \vec{v}_P$$

et donc finalement $\vec{v} = -\dfrac{m_P \cdot \vec{v}_P}{m_L + m_C}$.

Donc $v = \dfrac{m_P \cdot v_P}{m_L + m_C} = \dfrac{4{,}2 \times 2{,}5}{55 + 39} = 0{,}11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. On constate, grâce à l'égalité vectorielle, que le sens $\vec{v}$ est opposé à celui de $\vec{v}_P$; donc le canoë et Louisa se déplacent vers l'avant du canoë.
Le mouvement du canoë est alors rectiligne uniforme. Cela n'est vrai que si on peut négliger tous les frottements, ce qui n'est bien sûr pas le cas dans la réalité.

5 **Scooter des mers**
Un scooter des mers (ou jet ski) est un petit véhicule de loisir nautique propulsé par un hydrojet. Un hydrojet est un système de propulsion par réaction : l'eau est pompée sous le bateau puis accélérée par l'intermédiaire d'une turbine et enfin expulsée à haute vitesse derrière celui-ci.

1. *Expliquer pourquoi l'hydrojet est un système de propulsion par réaction.*
L'eau expulsée à haute vitesse derrière le scooter des mers est à l'origine de son mouvement : c'est le mode de propulsion par réaction.

2. *Quelles sont les principales différences entre le mode de propulsion d'un scooter des mers et celui d'une fusée ?*
Le scooter des mers expulse de l'eau alors que la fusée expulse des gaz. De plus, le scooter des mers utilise l'eau présente dans la mer alors que la fusée embarque à son bord son combustible et son comburant.

3. *Que peut-on dire du vecteur quantité de mouvement du scooter des mers ?*
Par analogie avec le mode de propulsion d'une fusée, on peut dire que le vecteur quantité de mouvement du scooter des mers est opposé à celui de l'eau expulsée.

4. *Un scooter des mers est capable de faire marche arrière. Expliquer comment cela est possible.*
Un dispositif de l'hydrojet permet de détourner la sortie d'eau vers l'avant, ainsi le scooter des mers est propulsé vers l'arrière.

COMPÉTENCE 2 : *Décrire les caractéristiques du mouvement d'une planète ou d'un satellite*

6 **1.** *Faux*. Elle s'applique à tous les objets massiques de l'Univers.

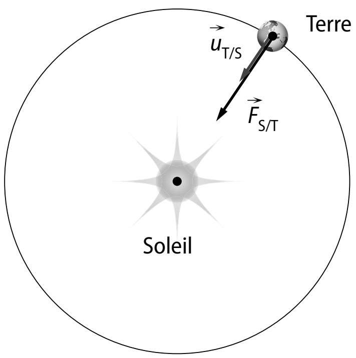
2. *Vrai*.

3. *Faux*. $a = v^2/r$.

4. *Faux*. C'est la durée qu'il lui faut pour faire un tour sur son orbite.

8 **1.** On doit se placer dans le référentiel héliocentrique galiléen.

2. $\vec{F}_{S/T} = \dfrac{G \cdot M_S \cdot M_T}{d_{ST}^2} \cdot \vec{u}_{TS}$ où $\vec{u}_{TS}$ est un vecteur unitaire porté par la droite (ST) orienté de T vers S.



3. On applique la deuxième loi de Newton à la Terre : $d\vec{p}/dt = \vec{F}_{S/T}$

donc $M_T \cdot d\vec{v}_T/dt = \dfrac{G \cdot M_S \cdot M_T}{d_{ST}^2} \cdot \vec{u}_{TS}$

donc $\vec{a}_T = \dfrac{G \cdot M_S}{d_{ST}^2} \cdot \vec{u}_{TS}$.

4. On a alors $\vec{v}_T \cdot \vec{a}_T = 0$, donc le mouvement de la Terre est uniforme.

5. On a $a_T = \dfrac{G \cdot M_S}{d_{ST}^2} = \dfrac{v_T^2}{d_{ST}}$ (car le mouvement est uniforme), donc $v_T = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_S}{d_{ST}}}$.

Donc $v_T = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_S}{d_{ST}}} = \sqrt{\dfrac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 1{,}99 \times 10^{30}}{149{,}6 \times 10^9}}$
$= 2{,}98 \times 10^4$ m · s^{-1}.

6. L'orbite de la Terre est un cercle de rayon d_{ST} donc la distance parcourue pendant la durée T_T est la circonférence du cercle $2\pi \cdot d_{ST}$ donc :

$$T_T = \frac{2\pi \cdot d_{ST}}{v_T} = \frac{2\pi \times 149{,}6 \times 10^9}{2{,}98 \times 10^4} = 3{,}15 \times 10^7 \text{ s.}$$

Donc $T_T = \dfrac{3{,}15 \times 10^7}{24 \times 3\,600} = 365$ j.

9 **1.** L'orbite de la Lune est un cercle de rayon r_L donc la distance parcourue pendant la durée T_L est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r_L$ donc :

$$T_L = \frac{2\pi r_L}{v_L} = \frac{2\pi \times 3{,}84 \times 10^8}{1{,}02 \times 10^3} = 2{,}37 \times 10^6 \text{ s.}$$

2. a. On convertit T_L en jours : $T_L = \dfrac{2{,}37 \times 10^6}{24 \times 3\,600} = 27{,}4$ j.

Ces deux périodes sont donc quasiment égales.
b. La Lune présente donc toujours le même hémisphère (nommé « face visible de la Lune ») à un observateur terrestre (l'autre hémisphère est donc appelé « face cachée de la Lune »).

COMPÉTENCE 3 : *Connaître les lois de Kepler et exploiter la troisième*

10 **1.** *Faux*. C'est l'inverse.

2. *Vrai*.

3. *Vrai*.

4. *Faux*. Elle dépend de la masse de l'astre attracteur.

5. *Vrai*.

11 **1.** Un référentiel planétocentrique est un référentiel centré sur une planète et dont les trois axes sont dirigés vers trois étoiles fixes.

2. Première loi de Kepler : dans un référentiel planétocentrique, l'orbite d'un satellite est une ellipse dont le centre de la planète occupe un des deux foyers.
Deuxième loi de Kepler : le segment reliant la planète au satellite balaye des aires égales pendant des durées égales.

Troisième loi de Kepler : le rapport entre le carré de la période de révolution T du satellite et le cube du demi-grand axe a de son orbite elliptique est constant, soit :

$\frac{T^2}{a^3} = \text{k}$ avec T en seconde (s), a en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : la planète.

$\text{k} = \frac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M_\text{P}}$ avec G constante de gravitation universelle :

$\text{G} = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ et M_P masse de la planète en kilogramme (kg).

3. Si le satellite a une trajectoire circulaire, alors on peut déduire de la deuxième loi de Kepler que sa vitesse est constante.

4. a. La troisième loi de Kepler devient : le rapport entre le carré de la période de révolution T du satellite et le cube du rayon r de son orbite circulaire est constant, soit :

$\frac{T^2}{r^3} = \text{k}$ avec T en seconde (s) et r en mètre (m) (l'expression de k est inchangée).

b. On a donc $r = \sqrt[3]{\frac{T^2 \cdot \text{G} \cdot M_\text{P}}{4\pi^2}}$.

12 **1.** On doit se placer dans un référentiel centré sur Saturne supposé galiléen.

2. Troisième loi de Kepler : le rapport entre le carré de la période de révolution T_E d'Encelade et le cube du rayon r_E de son orbite circulaire est constant, soit :

$\frac{T_\text{E}^2}{r_\text{E}^3} = \text{k}$ avec T_E en seconde (s), r_E en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : Saturne.

$\text{k} = \frac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M_\text{S}}$ avec G constante de gravitation universelle :

$\text{G} = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ et M_S masse de Saturne en kilogramme (kg).

3. On a donc :

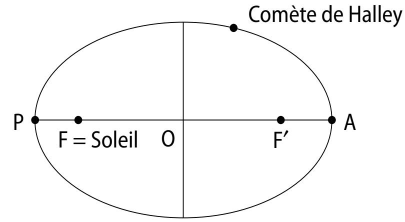
$$r_\text{E} = \sqrt[3]{\frac{T_\text{E}^2 \cdot \text{G} \cdot M_\text{S}}{4\pi^2}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{(1{,}37 \times 24 \times 3\,600)^2 \times 6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}69 \times 10^{26}}{4\pi^2}}$$

$$= 2{,}38 \times 10^8\ \text{m}.$$

13 **1. a.** Dans le référentiel héliocentrique, l'orbite de la comète de Halley est une ellipse dont le centre du Soleil occupe un des deux foyers.

b.



2. a. Le segment reliant le Soleil à la comète de Halley balaye des aires égales pendant des durées égales.
b. La vitesse de la comète de Halley n'est donc pas constante : elle augmente lorsque la comète se rapproche du Soleil et diminue lorsqu'elle s'en éloigne.
c. Sa vitesse est maximale au point P et minimale au point A.

14 **Quelle est cette planète ?**

Un satellite (S) décrit un mouvement circulaire uniforme autour d'une planète (P).

Données. *Rayon de l'orbite du satellite :* $r_S = 6{,}7 \times 10^5$ *km.*
Période de révolution du satellite : $T_S = 3$ *j 13 h 14 min.*

1. *Que devient la troisième loi de Kepler dans le cas de ce satellite (S) en mouvement circulaire uniforme ?*
La troisième loi de Kepler devient : le rapport entre le carré de la période de révolution T du satellite et le cube du rayon r de son orbite circulaire est constant, soit :

$\frac{T^2}{r^3} = \text{k}$ avec T en seconde (s), r en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : la planète (P).

$\text{k} = \frac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M_\text{P}}$ avec G constante de gravitation universelle :

$\text{G} = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ et M_P masse de la planète en kilogramme (kg).

2. *Calculer la période de révolution du satellite (S) en seconde.*
$T_S = 3 \times 24 \times 3\,600 + 13 \times 3\,600 + 14 \times 60 = 3{,}1 \times 10^5$ s.

3. a. *Exprimer puis calculer la masse* M_P *de la planète (P).*

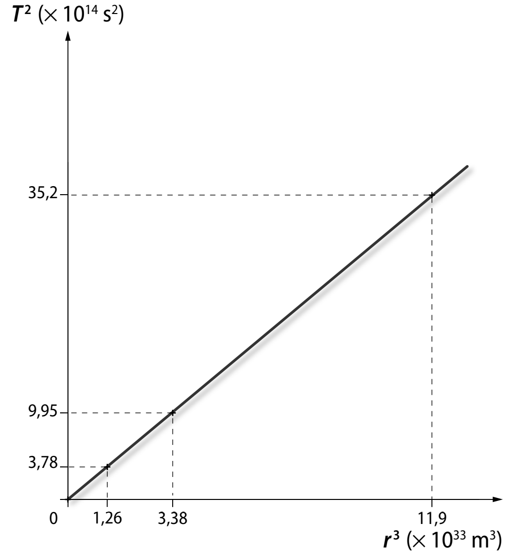
D'après la troisième loi de Kepler, on a $\frac{T_S^2}{r_S^3} = \frac{4\pi^2}{\text{G} \cdot M_\text{P}}$ donc

$$M_\text{P} = \frac{4\pi^2 \cdot r_S^3}{\text{G} \cdot T_S^2} = \frac{4\pi^2 \times (6{,}7 \times 10^8)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times (3{,}1 \times 10^5)^2} = 1{,}9 \times 10^{27}\ \text{kg}.$$

b. *En déduire son identité.*
D'après les données, la planète (P) est Jupiter.

15 **1.** On doit se placer dans le référentiel héliocentrique galiléen.

2. On peut utiliser l'échelle suivante : en abscisse, 1 cm pour $3{,}50 \times 10^{14}\ \text{s}^2$ et en ordonnée, 1 cm pour $1{,}00 \times 10^{33}\ \text{m}^3$.



3. a. Les points sont alignés suivant une droite passant par l'origine, donc T^2 est proportionnelle à r^3, la troisième loi de Kepler est donc bien vérifiée : le rapport entre le carré de la période de révolution des trois planètes et le cube du rayon de leur orbite est constant.
b. Soit a le coefficient directeur de la droite du graphe précédent, on a $a = 4\pi^2/(G \cdot M_S)$ donc $M_S = 4\pi^2/(G \cdot a)$ donc $M_S = 4\pi^2/(6{,}67 \times 10^{-11} \times 3{,}52 \times 10^{15}/(1{,}19 \times 10^{34}))$
$= 2{,}00 \times 10^{30}$ kg.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

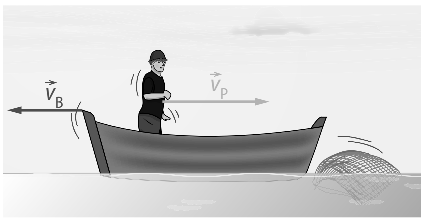
16 **1.** Le pêcheur ne va pas pouvoir récupérer son filet : comme il se déplace vers l'arrière, sa barque va se déplacer vers l'avant.

2. On définit le système (S), constitué du pêcheur et de sa barque. Ce système est pseudo-isolé, car les actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur lui se compensent. Sa quantité de mouvement se conserve donc. $\vec{p}_{\text{avant}}(S) = \vec{p}_{\text{après}}(S)$.

Donc $\vec{0} = m_B \cdot \vec{v}_B + m_P \cdot \vec{v}_P$, soit $\vec{v}_B = -\dfrac{m_P \cdot \vec{v}_P}{m_B}$.

$v_B = \dfrac{m_P \cdot v_P}{m_B} = \dfrac{85 \times 1{,}3}{105} = 1{,}1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Longueur du vecteur vitesse $\vec{v}_P$: 1,3/0,4 = 3,3 cm.
Longueur du vecteur vitesse $\vec{v}_B$: 1,1/0,4 = 2,8 cm.

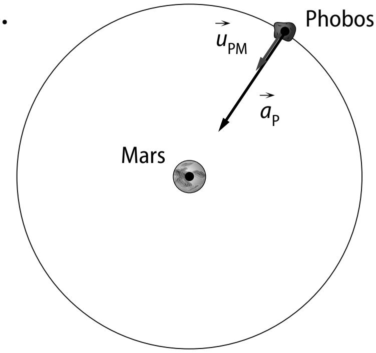


17 **1.** On doit se placer dans un référentiel centré sur Mars supposé galiléen.

2. On applique la deuxième loi de Newton à ce satellite : $d\vec{p}/dt = \vec{F}_{T/P}$ donc :

$m_P \cdot d\vec{v}_P/dt = \dfrac{G \cdot M_M \cdot m_P}{r^2} \cdot \vec{u}_{PM}$ donc $\vec{a}_P = \dfrac{G \cdot M_M}{r^2} \cdot \vec{u}_{PM}$.

3.



4. On a alors $\vec{v}_P \cdot \vec{a}_P = 0$, donc le mouvement de Phobos est uniforme.

5. a. On a $a_P = \dfrac{v_P^2}{r}$ car le mouvement est uniforme.

b. On a alors $a_P = \dfrac{G \cdot M_M}{r^2} = \dfrac{v_P^2}{r}$ donc $v_P = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_M}{r}}$.

c. $\left[\sqrt{\dfrac{G \cdot M_M}{r}}\right] = \sqrt{\dfrac{L^3 \cdot M^{-1} \cdot T^{-2} \cdot M}{L}} = \sqrt{L^2 \cdot T^{-2}} = L \cdot T^{-1}$

donc $\sqrt{\dfrac{G \cdot M_M}{r}}$ est bien homogène à une vitesse en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

d. $v_P = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_M}{r}} = \sqrt{\dfrac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 6{,}42 \times 10^{23}}{9{,}38 \times 10^6}}$

$= 2{,}14 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 2{,}14 \times 10^3 \times 3{,}6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
$= 7{,}70 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

6. a. L'orbite de Phobos est un cercle de rayon r donc la distance parcourue pendant la durée T_P est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r$ donc $T_P = \dfrac{2\pi \cdot r}{v_P}$.

b. $\dfrac{T_P^2}{r^3} = \dfrac{4\pi^2}{v_P^2 \cdot r^2} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_M}$.

c. On retrouve la troisième loi de Kepler.

d. $T_P = 2\pi \cdot \sqrt{\dfrac{r^3}{G \cdot M_M}} = 2\pi \sqrt{\dfrac{(9{,}38 \times 10^6)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 6{,}42 \times 10^{23}}}$

$= 2{,}76 \times 10^4 \text{ s} = 7{,}67$ h.

18 **1.** Les gaz expulsés par la fusée Rockot sont à l'origine de son mouvement : c'est le mode de propulsion par réaction.

2. On doit se placer dans un référentiel géocentrique supposé galiléen.

3. D'après la troisième loi de Kepler, on a $\dfrac{T^2}{r^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_T}$

avec $r = R_T + h$.

Donc $T = 2\pi \cdot \sqrt{\dfrac{(R_T + h)^3}{G \cdot M_T}}$

$= 2\pi \sqrt{\dfrac{(6,37 \times 10^6 + 265 \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 5,98 \times 10^{24}}}$

$= 5,38 \times 10^3$ s.

4. L'orbite du satellite GOCE est un cercle de rayon $R_T + h$. La distance parcourue pendant la durée T est la circonférence du cercle : $2\pi(R_T + h)$.

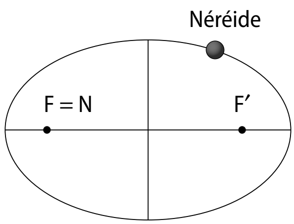
On a donc : $v = \dfrac{2\pi \cdot (R_T + h)}{T}$

$= \dfrac{2\pi(6,37 \times 10^6 + 265 \times 10^3)}{5,38 \times 10^3}$

$= 7,75 \times 10^3$ m · s^{-1}.

19 **1. a.** L'orbite de Néréide est fortement excentrique, cela signifie que cette orbite est une ellipse très « allongée ».

b.



c. D'après la deuxième loi de Kepler (le segment reliant Neptune à Néréide balaye des aires égales pendant des durées égales), la vitesse de Néréide n'est pas constante : elle augmente lorsque le satellite se rapproche de Neptune et diminue lorsqu'elle s'en éloigne.

2. L'orbite de Triton est un cercle de rayon r_T donc la distance parcourue pendant la durée T_T est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r_T$ donc $T_T = \dfrac{2\pi \cdot r_T}{v_T}$.

Donc $T_T = \dfrac{2\pi \times 3,6 \times 10^8}{4,4 \times 10^3} = 5,1 \times 10^5$ s.

3. a. Troisième loi de Kepler : le rapport entre le carré de la période de révolution T de chaque satellite de Neptune et le cube du demi-grand axe a de son orbite est constant, soit :

$\dfrac{T^2}{a^3} = k$ avec T en seconde (s), a en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : Neptune.

b. On a donc $\dfrac{T_T^2}{r_T^3} = \dfrac{T_N^2}{a_N^3}$.

Donc $T_N = T_T \cdot \sqrt{\dfrac{a_N^3}{r_T^3}} = 5,1 \times 10^5 \times \sqrt{\left(\dfrac{5,5 \times 10^9}{3,6 \times 10^8}\right)^3}$

$= 3,0 \times 10^7$ s.

20 **1. a.** D'après le principe des actions réciproques, la fusée exerce une action mécanique sur les gaz expulsés modélisée par une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé à celle qui modélise l'action mécanique qu'exercent les gaz expulsés sur la fusée. C'est cette dernière action mécanique qui est responsable du mouvement d'ascension de la fusée.

b. Dans un référentiel galiléen, on considère un système isolé (S) constitué par la fusée ainsi que son contenu (y compris son combustible et son comburant) de masse m_0.

– À $t = 0$, le système est immobile, on a alors :

$$\vec{p}_{(S)}(t = 0) = m_0 \cdot \vec{0} = \vec{0}.$$

– À un instant t, la fusée a expulsé une certaine quantité de gaz, on a alors :

$$\vec{p}_{(S)}(t) = \vec{p}_{(\text{gaz expulsés})}(t) + \vec{p}_{(\text{fusée})}(t).$$

Comme, dans un référentiel galiléen, le vecteur quantité de mouvement d'un système isolé est constant : $\vec{p}_{(S)}(t = 0) = \vec{p}_{(S)}(t)$ donc $\vec{0} = \vec{p}_{(\text{gaz expulsés})}(t) + \vec{p}_{(\text{fusée})}(t)$.

Donc finalement $\vec{p}_{(\text{fusée})}(t) = -\vec{p}_{(\text{gaz expulsés})}(t)$.

c. Le lancement a eu lieu avec une heure de retard à cause des vents en altitude. Il fallait décaler le lancement sinon les vents auraient modifié la trajectoire de la fusée et les satellites n'auraient alors jamais atteint leurs orbites prévues.

2. a. Orbite de transfert géostationnaire : c'est une orbite elliptique intermédiaire qui permet de placer des satellites en orbite géostationnaire.

Orbite géostationnaire : c'est une orbite circulaire située à 35 786 km d'altitude au-dessus de l'équateur de la Terre, dans le plan équatorial.

b. Le satellite Astra 1N n'est pas placé par Ariane 5 directement sur son orbite définitive, puisqu'il est placé sur une orbite de transfert qui va lui permettre ensuite d'atteindre son orbite définitive.

3. a. On doit se placer dans un référentiel géocentrique supposé galiléen.

b. Dans ce référentiel, le satellite n'est soumis qu'à l'action mécanique exercée par la Terre. Elle est modélisée par la force : $\vec{F}_{T/S} = \dfrac{G \cdot m_S \cdot M_T}{r_S^2} \cdot \vec{u}_{ST}$.

On applique alors la deuxième loi de Newton à ce satellite : $d\vec{p}/dt = \vec{F}_{T/S}$;

donc $m_S \cdot d\vec{v}_S/dt = \dfrac{G \cdot m_S \cdot M_T}{r_S^2} \cdot \vec{u}_{ST}$

donc $\vec{a}_S = \dfrac{G \cdot M_T}{r_S^2} \cdot \vec{u}_{ST}$.

c. On a alors $\vec{v}_S \cdot \vec{a}_S = 0$, donc le mouvement du satellite est uniforme.

d. On a $a_S = \frac{G \cdot M_T}{r_S^2} = \frac{v_S^2}{r_S}$ (car le mouvement est uniforme) donc $v_S = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{r_S}}$.

Donc $v_S = \sqrt{\frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}98 \times 10^{24}}{4{,}2 \times 10^7}} = 3{,}1 \times 10^3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

e. L'orbite de ce satellite est un cercle de rayon r_S donc la distance parcourue pendant la durée T_S est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r_S$ donc :

$$T_S = \frac{2\pi \cdot r_S}{v_S} = \frac{2\pi \times 4{,}2 \times 10^7}{3{,}1 \times 10^3} = 8{,}5 \times 10^4\ \text{s}.$$

Donc $T_S = \frac{8{,}5 \times 10^4}{3\,600} = 24$ h.

f. Un satellite géostationnaire a une orbite circulaire dans le plan équatorial et sa période de révolution est égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même. Il possède donc la particularité d'être toujours positionné au-dessus du même point de la surface de la Terre.

21 **1.** « Rotation rétrograde » : le mouvement de rotation de Vénus sur elle-même se fait dans le sens opposé à celui de Vénus autour du Soleil.
« Période de rotation » : c'est la durée nécessaire à Vénus pour faire un tour sur elle-même.
« Période de révolution » : c'est la durée nécessaire à Vénus pour faire un tour sur son orbite autour du Soleil.

2. On doit se placer dans le référentiel héliocentrique galiléen.

3. On applique la deuxième loi de Newton à Vénus :

$$d\vec{p}/dt = \vec{F}_{S/V}$$

donc $M_V \cdot d\vec{v}_V/dt = \frac{G \cdot M_S \cdot M_V}{d_{SV}^2} \cdot \vec{u}_{VS}$

donc $\vec{a}_V = \frac{G \cdot M_S}{d_{SV}^2} \cdot \vec{u}_{VS}$.

4. On a $a_V = \frac{G \cdot M_S}{d_{SV}^2} = \frac{v_V^2}{d_{SV}}$ (car le mouvement est uniforme), donc $v_V = \sqrt{\frac{G \cdot M_S}{d_{SV}}}$.

Donc $v_V = \sqrt{\frac{6{,}6 \times 10^{-11} \times 2{,}0 \times 10^{30}}{1{,}0 \times 10^{11}}} = 3{,}6 \times 10^4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. a. L'orbite de Vénus est un cercle de rayon d_{SV}, donc la distance parcourue pendant la durée T_V est la circonférence du cercle $2\pi \cdot d_{SV}$ donc :

$$T_V = \frac{2\pi \cdot d_{SV}}{v_V} = \frac{2\pi \times 1{,}0 \times 10^{11}}{3{,}6 \times 10^4} = 1{,}7 \times 10^7\ \text{s}.$$

Donc $T_V = \frac{1{,}7 \times 10^7}{24 \times 3\,600} = 2{,}0 \times 10^2$ j.

b. On a $T_V < 243$ jours, donc la période de révolution de Vénus est bien inférieure à sa période de rotation.

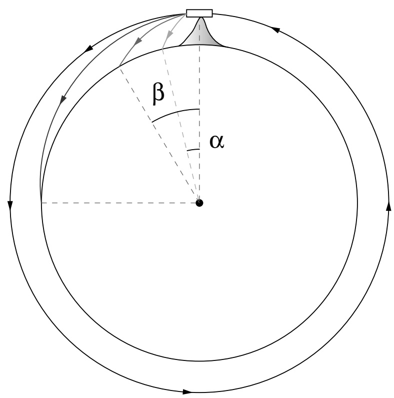
22 **A. 1. a.** Avant le tir, le système (S) est un système pseudo-isolé car les actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur lui se compensent.
b. On a $\vec{p}_{avant}(S) = m_S \cdot \vec{0} = \vec{0}$.

2. On a $\vec{p}_{après}(S) = \vec{p}_{après}(\text{canon}) + \vec{p}_{après}(\text{boulet})$. Comme le système (S) est pseudo-isolé, sa quantité de mouvement se conserve, on a donc $\vec{p}_{avant}(S) = \vec{p}_{après}(S)$ donc $\vec{0} = \vec{p}_{après}(\text{canon}) + \vec{p}_{après}(\text{boulet})$ et donc finalement $\vec{p}_{après}(\text{canon}) = -\vec{p}_{après}(\text{boulet})$.

3. Le vecteur quantité de mouvement du canon après le tir est donc opposé à celui du boulet de canon. Comme le boulet de canon se déplace vers l'avant, le canon se déplace vers l'arrière : c'est le phénomène de recul du canon.

B. 1. Il n'y a qu'une action mécanique qui s'exerce sur le boulet au cours de son mouvement (puisqu'on néglige celle de l'air), elle est modélisée par la force de la Terre sur le boulet $\vec{F}_{T/B}$.

2.



$\alpha = 10°$
$\beta = 30°$

3. Le boulet de canon est alors satellisé : il est en orbite circulaire autour de la Terre.

4. On a alors $r \approx R_T$ car on peut négliger la hauteur de la montagne (de l'ordre du km) par rapport au rayon de la Terre (plus de 6 000 km).

5. a. Troisième loi de Kepler : le rapport entre le carré de la période de révolution T du boulet de canon et le cube du rayon r de son orbite est constant, soit :

$\frac{T^2}{r^3} = k$ avec T en seconde (s), r en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : la Terre.

$k = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_T}$ avec G constante de gravitation universelle : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$ et M_T masse de la Terre en kilogramme (kg).

b. D'après la troisième loi de Kepler, on a $\dfrac{T_B^2}{r^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_T}$ avec $r = R_T$,

donc $T_B = 2\pi \cdot \sqrt{\dfrac{R_T^3}{G \cdot M_T}}$.

D'où $T_B = 2\pi \sqrt{\dfrac{(6{,}37 \times 10^6)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}98 \times 10^{24}}} = 5{,}06 \times 10^3$ s.

Donc $T_B = \dfrac{5{,}06 \times 10^3}{3\,600} = 1{,}41$ h.

c. L'orbite du boulet de canon est un cercle de rayon r, donc la distance parcourue pendant la durée T_B est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r$,

donc $v = \dfrac{2\pi \cdot r}{T}$ avec $r = R_T$.

Donc $v_B = \dfrac{2\pi \cdot R_T}{T_B} = \dfrac{2\pi \times 6{,}37 \times 10^6}{5{,}06 \times 10^3} = 7{,}91 \times 10^3\ m \cdot s^{-1}$.

6. Sur l'image de l'énoncé, on voit qu'à partir de 8 000 $m \cdot s^{-1}$ le boulet de canon fait le tour de la Terre, la valeur de v_B trouvée est très proche de 8 000 $m \cdot s^{-1}$. Il est indiqué également que le boulet fait un tour complet de la Terre en 1 h 23 min, or on a $T_B = 1{,}41$ h $= 1$ h 25 min, ces deux valeurs sont également très proches.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

23 1. a. On a $r = r_P$ lorsque $\theta = 0$, donc $r_P = \dfrac{p}{1+e}$.

b. On a $r = r_A$ lorsque $\theta = 180°$, donc $r_A = \dfrac{p}{1-e}$.

2. On a $r = p$ lorsque $\cos\theta = 0$, soit $\theta = 90°$ ou $\theta = 270°$.

3. a. D'après la troisième loi de Kepler, on a $\dfrac{T^2}{r^3} = k$ avec T en seconde (s), r en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : la Terre.
Donc comme $r_2 > r_1$, on a $T_2 > T_1$.

b. On a donc $\dfrac{T_1^2}{r_1^3} = \dfrac{T_2^2}{r_2^3}$.

Donc $\dfrac{T_2}{T_1} = \sqrt{\dfrac{r_2^3}{r_1^3}} = \sqrt{\left(\dfrac{800}{200}\right)^3} = 8{,}00$.

4. a. Le centre de la Terre est un des deux foyers de l'ellipse correspondant à l'orbite de transfert.
b. D'après les schémas de l'énoncé, on a $r_P = r_1$ et $r_A = r_2$.

5. a. On trouve $p = 2 \times \dfrac{r_2 \cdot r_1}{r_2 + r_1}$ et $e = \dfrac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}$.

b. Donc $p = 2 \times \dfrac{800 \times 200}{800 + 200} = 320$ km

et $e = \dfrac{800 - 200}{800 + 200} = 0{,}600$.

6. a. On a $2a = r_1 + r_2$. Donc $a = \dfrac{r_1 + r_2}{2}$.

b. $a = \dfrac{200 + 800}{2} = 500$ km.

Travail d'une force

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Travail d'une force. – Force conservative. – Énergie potentielle. – Forces non conservatives : exemple des frottements.	– Établir et exploiter les expressions du travail d'une force constante (force de pesanteur, force électrique dans le cas d'un champ uniforme). – Établir l'expression du travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne.

Les compétences à acquérir dans la séquence
1. Établir et exploiter l'expression du travail de la force électrique.
2. Établir et exploiter l'expression du travail de la force de pesanteur.
3. Établir l'expression du travail d'une force de frottement.

Évaluation diagnostique *p. 182*

SITUATION 1

Il s'agit de vérifier que les élèves maîtrisent les notions d'actions et de forces vues en Seconde : les effets d'une action sur le mouvement d'un corps, sa modélisation par une force, les caractéristiques d'une force et sa représentation vectorielle.
Savoir distinguer droite d'action de la force exercée et direction du mouvement du receveur est également essentiel. Une force peut modifier le mouvement d'un corps même si elle ne s'exerce pas dans la direction du mouvement. Alors que la force pressante exercée par les skis sur la neige est normale à la surface pressée, la direction du mouvement sera donnée par celle du vecteur vitesse. L'**activité 1** permet découvrir les paramètres intervenant dans l'expression du travail d'une force constante lors d'un déplacement de son point d'application puis d'en proposer un modèle mathématique.

SITUATION 2

En s'appuyant sur les acquis de Première S (conservation ou non de l'énergie mécanique d'un système, frottements, énergie potentielle de pesanteur), il s'agit ici d'amorcer une réflexion sur les transferts d'énergie lors du déplacement d'un skieur. L'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} est une grandeur qui dépend de l'altitude z et de la masse m du solide étudié. Ainsi, lors de son ascension, l'énergie potentielle de pesanteur du skieur augmente progressivement grâce au travail fournit par le système de remontées mécaniques. L'énergie potentielle de pesanteur acquise par le skieur sera donc identique quel que soit le chemin suivi puisque les positions de départ et d'arrivée le sont. On peut donc supposer, qu'en l'absence de frottements, dissipatifs, le travail fournit par les remontées mécaniques sera le même. Le travail des forces de frottement, forces non conservatives, est abordé dans l'**activité 3** ; celui de la force de pesanteur, conservative, dans l'**activité 2**.

SITUATION 3

Un corps est dit en chute libre dans le champ de pesanteur terrestre lorsqu'il est uniquement soumis à l'action de son poids. Le terme *libre* est donc adapté lorsqu'il s'agit de situations dans lesquelles les actions de l'air (frottements et poussée d'Archimède) sont négligeables devant la valeur du poids du corps. Dans la situation proposée, le travail des frottements de l'air conduit à une conversion de l'énergie des poussières de comètes en énergie thermique par rayonnement et transfert de chaleur. Le travail des frottements n'est donc plus négligeable et le terme libre n'est pas justifié. L'**activité 3** reprend à travers deux autres exemples le travail des forces de frottement et montre qu'elles sont des forces non conservatives.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Accélérateur de particules p. 184

1. et **2.** La saisie et le traitement des données (tracés de graphes, modélisation) pourront être assistés par ordinateur.

Constantes	AB = 15 m et $\alpha = 20°$				
Grandeur testée	*F* (en N)				
	0	$1{,}0 \times 10^{-2}$	$2{,}5 \times 10^{-2}$	$5{,}0 \times 10^{-2}$	$1{,}0 \times 10^{-1}$
Travail $W_{AB}(\vec{F})$ (en J)	0	$1{,}4 \times 10^{-1}$	$3{,}5 \times 10^{-1}$	$7{,}0 \times 10^{-1}$	1,4
Modèle	$W_{AB}(\vec{F}) = a_1 \cdot F$ $a_1 = 1{,}4 \times 10^1$ soit $a_2 = \text{AB} \cdot \cos \alpha$				

Constantes	$F = 5{,}0 \times 10^{-2}$ m et $\alpha = 20°$				
Grandeur testée	AB (en m)				
	0	5,0	10	15	20
Travail $W_{AB}(\vec{F})$ (en J)	0	$2{,}3 \times 10^{-1}$	$4{,}7 \times 10^{-1}$	$7{,}0 \times 10^{-1}$	$9{,}4 \times 10^{-1}$
Modèle	$W_{AB}(\vec{F}) = a_2 \cdot \text{AB}$ $a_2 = 4{,}7 \times 10^{-2}$ soit $a_2 = F \cdot \cos \alpha$				

Constantes	$F = 5{,}0 \times 10^{-2}$ m et AB = 15 m			
Grandeur testée	α en degré et $\cos \alpha$			
	0°	20°	45°	90°
	1	$9{,}4 \times 10^{-1}$	$7{,}1 \times 10^{-1}$	0
Travail $W_{AB}(\vec{F})$ (en J)	$7{,}5 \times 10^{-1}$	$7{,}0 \times 10^{-1}$	$5{,}3 \times 10^{-1}$	0
Modèle	$W_{AB}(\vec{F}) = a_3 \cdot \cos \alpha$ $a_3 = 7{,}5 \times 10^{-1}$ soit $a_3 = F \cdot \text{AB}$			

3. a. et **b.** Le travail d'une force dont le point d'application se déplace est d'autant plus important que :
– son intensité est grande ;
– le déplacement est long ;
– l'angle formé entre les vecteurs force $\vec{F}$ et déplacement $\overrightarrow{AB}$ est faible.

4. L'exploitation de l'expérience simulée amène l'expression $W_{AB}(\vec{F}) = F \cdot \text{AB} \cdot \cos \alpha$.
$W_{AB}(\vec{F})$ est le travail d'une force *F* constante, lors du déplacement rectiligne AB de son point d'application de A vers B.
$W_{AB}(\vec{F})$ s'exprime en Joule (J), *F* en Newton (N) et AB en mètre (m).

5. a. Si la direction de la force $\vec{F}$ est perpendiculaire au déplacement, ou si son point d'application ne se déplace pas, alors la force ne travaille pas.
Il ne suffit donc pas qu'il y ait déplacement du point d'application pour qu'une force travaille.
b. Le travail fourni est maximal lorsque les vecteurs force et déplacement sont colinéaires.
S'ils sont de même sens, le travail est moteur car la force favorise le déplacement. Dans le cas où ils sont de sens opposés, le travail est résistant car la force s'oppose au mouvement.

6. Dans le cas d'une force électrique $\vec{F}_e$:
$W_{AB}(\vec{F}_e) = |q| \cdot E \cdot \ell \cdot \cos \alpha = |q| \cdot E \cdot \ell$ si $q > 0$ et $\alpha = 0°$.

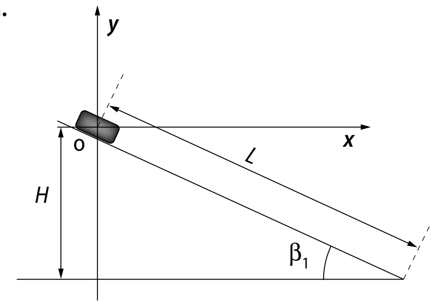
ACTIVITÉ 2

Hommes volants p. 185

On partira ici des mesures suivantes : m = 69,6 g, L = 139 cm et H = 17,9 cm.

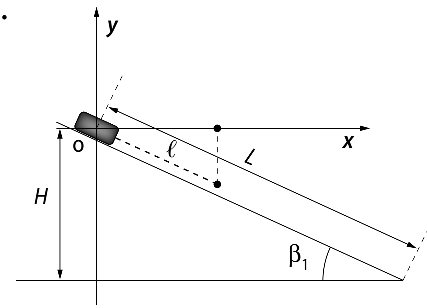
1. Le mobile décrit un mouvement rectiligne accéléré.

2. a.

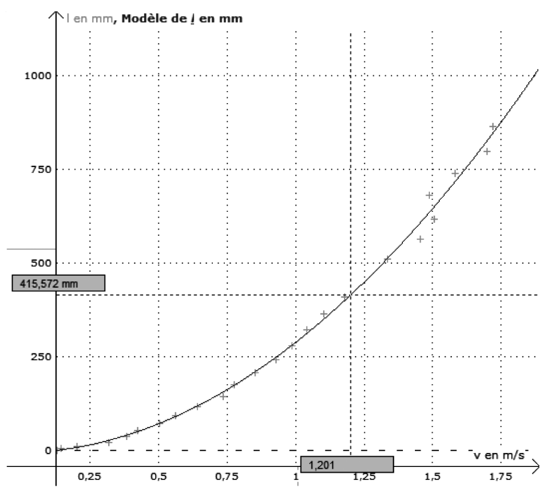


b. $\sin \beta_1 = H/L$ soit $\beta_1 = 7{,}40° = 1{,}29 \times 10^{-1}$ rad.

3.

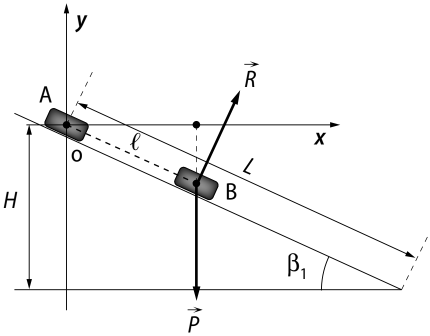


$\ell^2 = x^2 + y^2$ donc ℓ est donnée par $\ell = (x^2 + y^2)^{1/2}$.



ℓ_1 = 415 mm

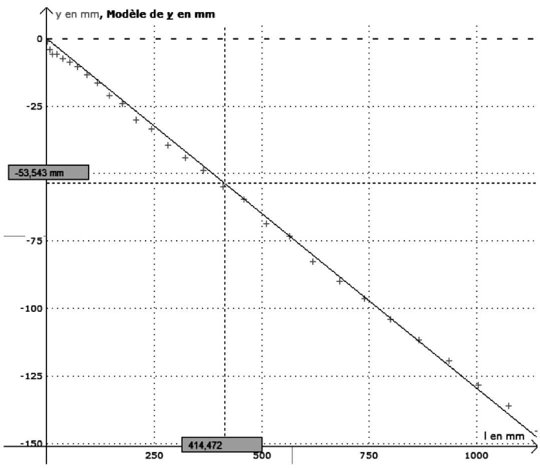
4. a. Étant situé dans le champ de pesanteur terrestre, le mobile est soumis à l'action de son poids $\vec{P}$ (la force de pesanteur) et à la réaction $\vec{R}$ du support. Les frottements étant négligeables, $\vec{R}$ est normale au plan du support.

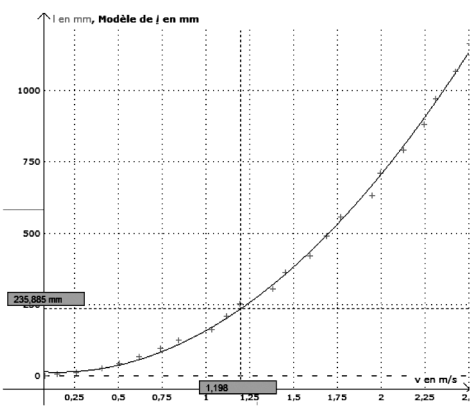


b. Pour un déplacement AB du centre d'inertie du mobile : $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AB} = m \cdot g \cdot \ell \cdot \cos(90 - \beta) = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin \beta$ et $W(R) = 0$ J car $\vec{R}$ est perpendiculaire au déplacement $\overrightarrow{AB}$.

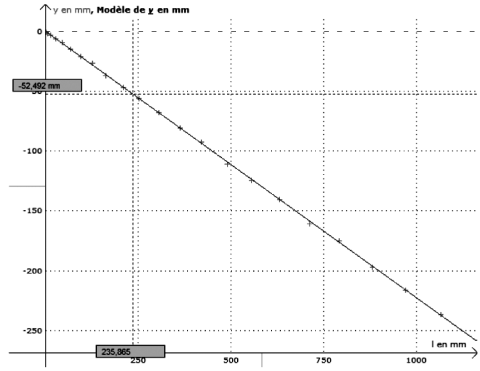
c. Pour un déplacement $\ell = \ell_1$: $W_1(\vec{P}) = 3{,}65 \times 10^{-2}$ J.

5. À partir du graphe $y = f(\ell)$, on constate $h_1 = 5{,}36$ cm.





6.



Pour un angle $\beta_2 = 12{,}8° = 2{,}23 \times 10^{-1}$ rad,
$\ell_2 = 236$ mm, $W_2(\vec{P}) = 3{,}73 \times 10^{-2}$ J et $h_2 = 5{,}25$ cm.

Expérience	n° 1 (pente 12,8 %)	n° 2 (pente 22,1 %)
Angle	$\beta_1 = 7{,}4°$	$\beta_2 = 12{,}8°$
ℓ	$\ell_1 = 415$ mm	$\ell_2 = 236$ mm
h	$h_1 = 5{,}36$ cm	$h_2 = 5{,}25$ cm
W	$W_1(\vec{P}) = 3{,}65 \times 10^{-2}$ J	$W_2(\vec{P}) = 3{,}73 \times 10^{-2}$ J

En tenant compte des incertitudes liées aux mesures et au pointage, on constate que $W_1(\vec{P}) = W_2(\vec{P})$. De plus $h_1 = h_2$ mais en revanche $\ell_1 \neq \ell_2$ et $\beta_1 \neq \beta_2$.

7. a. Le travail de la force de pesanteur lors d'un déplacement entre deux points A et B est indépendant du chemin suivi (de sa longueur) pour aller de A vers B (on pourra faire remarquer que sur un déplacement horizontal, le travail de la force de pesanteur, verticale, est forcément nul).

b. $W_{AB}(\vec{P})$ dépend de la différence d'altitude entre les deux points du déplacement.

ACTIVITÉ 3

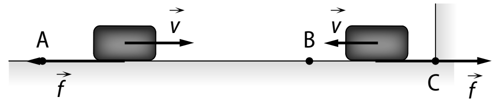
Un travail non négligeable p. 186

1. a. Les actions mécaniques exercées par un fluide ou la surface d'un support sur un solide en déplacement sont évoqués dans le texte. La distinction est faite entre les frottements fluides lorsqu'un solide se déplace au sein d'un liquide ou d'un gaz, et les frottements de glissement lors de son déplacement sur un support solide.

b. Des forces de frottements présentent les deux caractéristiques suivantes : leur direction est celle du déplacement (donnée par la direction du vecteur vitesse) et leur sens est opposé à celui du vecteur vitesse.

c. Le travail fourni est résistant car ces forces s'opposent au mouvement, donc $W_{AB}(\vec{f}) < 0$.

2. a.



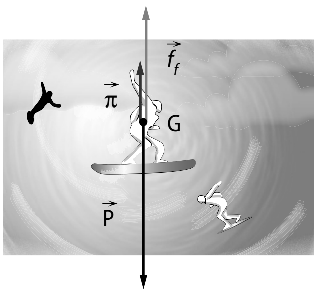
b. Pour le déplacement direct de A en B :

$$W_{AB}(\vec{f}) = -f \cdot AB.$$

Pour le déplacement de A en B passant par C :
$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \overrightarrow{AC} + \vec{f} \cdot \overrightarrow{CB} = -f \cdot AC - f \cdot CB = -f \cdot (AB + 2\,BC)$.
c. On constate que $W_{AB}(\vec{f})$ dépend du chemin suivi pour aller de A en B.

3. a. Le *skysurfer* est soumis à l'action de trois forces pendant sa chute verticale :

Caractéristiques	**La force de pesanteur $\vec{P}$**	**La poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$ due à l'air**	**Les frottements fluides $\vec{f}$ dus à l'air atmosphérique**
point d'application	centre de gravité G du skysurfer	centre de gravité G du skysurfer	centre de gravité G du skysurfer
direction	verticale	verticale	verticale
sens	vers la Terre	vers le haut	vers le haut
intensité	$P = m \cdot g$	$\Pi = \rho_{air} \cdot V_S \cdot g$	f



b. Dans le référentiel terrestre, considéré comme Galiléen, la première loi de Newton amène :
$$\Sigma \vec{F}_{ext} = \vec{\Pi} + \vec{f} + \vec{P} = \vec{0}.$$
c. $W_{AB}(\vec{\Pi}) + W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{P}) = \vec{\Pi} \cdot \overrightarrow{AB} + \vec{f} \cdot \overrightarrow{AB} + \vec{P} \cdot \overrightarrow{AB} = (\vec{\Pi} + \vec{f} + \vec{P}) \cdot \overrightarrow{AB}$
$W_{AB}(\vec{\Pi}) + W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{P}) = \Sigma \vec{F}_{ext} \cdot \overrightarrow{AB} = \vec{0} \cdot \overrightarrow{AB} = 0.$
$W(\Sigma \vec{F}_{ext}) = 0.$
d. D'après **3. c.**, $W(\Sigma \vec{F}_{ext}) = \Sigma\, W(\vec{F}_{ext}) = 0.$
$W_{AB}(\vec{\Pi}) + W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{P}) = 0$ donc :
$$W_{AB}(\vec{f}) = -\,W_{AB}(\vec{P}) - W_{AB}(\vec{\Pi}).$$
e. Le travail de la force de pesanteur est moteur :
$W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = 80 \times 9{,}8 \times (200 \times 50/3{,}6) = 2{,}2 \times 10^6$ J.
Le travail de la poussée d'Archimède est résistant :
$W_{AB}(\vec{\Pi}) = -\,\rho_{air} \cdot V_S \cdot g \cdot (z_A - z_B)$
$= -\,1{,}0 \times 3{,}0 \times 10^{-1} \times 9{,}81 \times (200 \times 50/3{,}6)$
$= -\,8{,}2 \times 10^3$ J.
$W_{AB}(\vec{f}) = -\,2{,}2 \times 10^6$ J.
$W_{AB}(\vec{f}) < 0$, ce qui est en accord avec la réponse donnée en **1.c**.

4. Lors d'un déplacement de A en B de son point d'application, le travail d'une force de frottement $\vec{f}$ constante et constamment opposée au mouvement a pour expression :
$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \overrightarrow{AB} = f \cdot AB \cdot \cos 180° = -\,f \cdot AB.$$

5. Le travail d'une force de frottement $\vec{f}$ constante lors d'un déplacement de son point d'application de A en B dépend du chemin suivi pour aller de A en B : une force de frottement est non conservative.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *Établir et exploiter l'expression du travail de la force électrique*

1 **1.** *Faux*. L'angle entre les vecteurs force et déplacement doit, de plus, être différent de 90°.

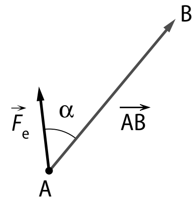
2. *Faux*. AB doit, de plus, être exprimé en mètre.

3. *Vrai*.

4. *Vrai*.

2 **1. a.** $W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = F_e \cdot AB \cdot \cos \alpha.$

b.

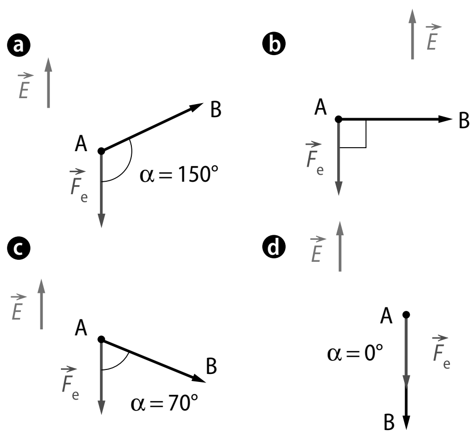


c. F_e est la valeur ou l'intensité de la force électrique en Newton (N), AB la longueur du déplacement en mètre (m) et α est l'angle entre les vecteurs $\vec{F}_e$ et AB en degré ou radian. Le travail s'exprime en joule (J).
d. Les valeurs $\vec{F}_e$ et $\overrightarrow{AB}$ étant toujours positives, le signe du travail est celui du cosinus de l'angle α.

2.

Travail	moteur et maximal	résistant et maximal	moteur	résistant	nul
pour	$\alpha = 0°$	$\alpha = 180°$	$0° \leqslant \alpha < 90°$	$90° < \alpha \leqslant 180°$	$\alpha = 90°$ ou $AB = 0$
et	$W_{AB}(\vec{F}) > 0$	$W_{AB}(\vec{F}) < 0$	$W_{AB}(\vec{F}) > 0$	$W_{AB}(\vec{F}) < 0$	$W_{AB}(\vec{F}) = 0$
	$W_{AB}(\vec{F}) = F \cdot AB$	$W_{AB}(\vec{F}) = -\,F \cdot AB$	$W_{AB}(\vec{F}) = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$		

4 **1.**



2. $W_{AB}(\vec{F}_e) = |q| \cdot E \cdot AB \cdot \cos \alpha$ avec $q = -\,e$.

3. Dans les cas a, c et d : la force électrique change de sens car la charge est désormais négative. L'angle α est donc modifié et devient $\alpha' = 180 - \alpha$.

4.

	ⓐ	ⓑ	ⓒ	ⓓ
$W_{AB}(\vec{F_e})$	$-1{,}1 \times 10^{-1}$ J	0 J	$4{,}3 \times 10^{-2}$ J	$1{,}2 \times 10^{-1}$ J
Travail	résistant	nul	moteur	moteur et maximal

5 **1. a.** $W(\vec{F_e}) = \vec{F_e} \cdot \vec{l} = Z \cdot \mathrm{e} \cdot E \cdot \ell \cdot \cos\alpha$, où α est l'angle entre les vecteurs $\vec{F_e}$ et $\vec{\ell}$.
b. Le travail étant moteur et maximal alors nécessairement $\vec{F_e}$ et $\vec{\ell}$ sont colinéaires et de même sens ($\alpha = 0°$).
c. $W_{AB}(\vec{F_e}) = 6{,}4 \times 10^{-14}$ J.

2. a. $U = E \cdot \ell = 200$ kV.
b. L'énergie acquise par un noyau (de charge 2e) accéléré sous une tension $U = 200$ kV est 400 keV.
c. 400 keV $= 400 \times 10^3 \times 1{,}6 \times 10^{-19}$ J $= 6{,}4 \times 10^{-14}$ J.

3. a. On constate que $W_{AB}(\vec{F_e}) = \vec{F_e} \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot U_{AB}$.
b. Le travail d'une force électrique constante exercée sur une particule lors d'un déplacement entre deux points A et B dépend uniquement de la charge de la particule et de la tension électrique entre les deux points.

COMPÉTENCE 2 : *Établir et exploiter l'expression du travail de la force de pesanteur*

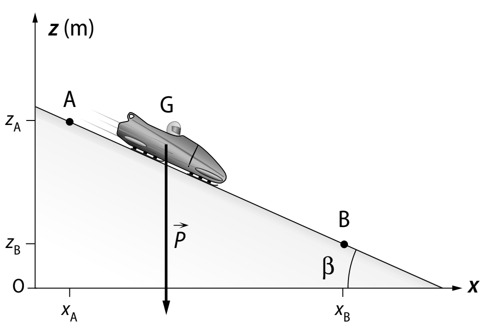
6 **1. c** et **d.**

2. a.

8 **1. a.** G.W. Leibniz est un philosophe et savant allemand du XVII^e siècle (1646-1716).
b. Aune : ancienne unité de longueur surtout utilisée pour les étoffes, 1 aune = 1,20 m.
Livre : ancienne unité de masse équivalent à 453,6 g.

2. a. Le travail d'une force constante.
b. L'angle entre la direction de la force de pesanteur et celle du déplacement doit être nul.
c. Soit h la hauteur de chute et m la masse du corps, alors $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h$ avec $g = 9{,}81$ N $\cdot$ kg^{-1}.
d. Dans le 1er cas : $h = 4 \times 1{,}20$ m et $m = 453{,}6$ g donc $W_1(\vec{P}) = 21{,}4$ J.
Dans le 2nd cas : $h = 1{,}20$ m et $m = 4 \times 453{,}6$ g donc $W_2(\vec{P}) = 21{,}4$ J.

9 **1.**



2. a. $\alpha = 90° - \beta$.
b. $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot AB \cdot \cos\alpha = m \cdot g \cdot AB \cdot \sin\beta$.
c. $W_{AB}(\vec{P}) = 1{,}83 \times 10^5$ J.
d. Le travail fourni est moteur car sa valeur est positive.

3. a. $AH = AB \cdot \cos\alpha$ et $AH = (z_A - z_B)$.
b. $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot AB \cdot \cos\alpha$ donc $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$.
c. $W_{AB}(\vec{P}) = 1{,}83 \times 10^5$ J.

4. $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$ car elle ne fait pas intervenir AB.

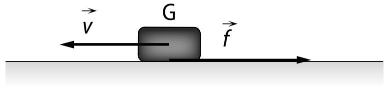
COMPÉTENCE 3 : *Établir l'expression d'une force de frottement constante*

10 **1. b** et **c.**

2. a. et **d.**

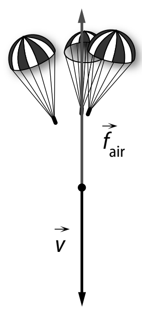
3. a.

11 **1.**



2. $W_\ell(\vec{f}) = -f \cdot \ell = 3{,}0 \times 2{,}50 = -7{,}5$ J car l'angle entre les deux vecteurs vaut 180°.

12 **1.**

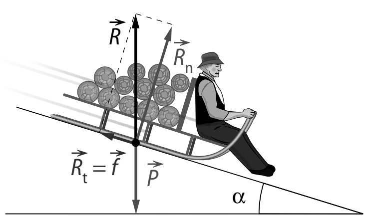


2. a. Le travail est résistant et maximal car la force est colinéaire et opposée au vecteur vitesse : elle s'oppose au mouvement.
b. $W_{AB}(\vec{f}_{air}) = -f_{air} \cdot AB$.

3. a. Soit Δt la durée la chute.
$AB = v \cdot \Delta t = (35/3{,}6) \times 60 = 583$ m $= 5{,}8 \times 10^2$ m.
b. $W_{AB}(\vec{f}_{air}) = -f_{air} \cdot AB = -f_{air} \cdot v \cdot \Delta t$.
c. $W_{AB}(\vec{f}_{air}) = -2{,}3 \times 10^3 \times (35/3{,}6) \times 60 = -1{,}3 \times 10^6$ J
$= -1{,}3$ MJ.
La valeur du travail est bien négative.

13 **1. a.** Le mouvement étant rectiligne uniforme, on a :
$\vec{R} = -\vec{P}$.

1. b et **2. a.**

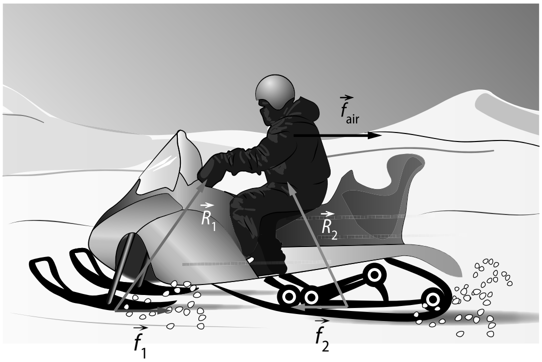


2. b. C'est la composante normale $\vec{R}_n$.
$\vec{R}_t$ est la force de frottement $\vec{f}$ due au support.

3. a. $W_\ell(\vec{R}) = R \cdot \ell \cdot \cos(90° - \alpha)$.
b. $W_\ell(\vec{R}_n) = R_n \cdot \ell \cdot \cos(90°) = 0$.
c. $W_\ell(\vec{f}) = f \cdot \ell \cdot \cos(180°) = -f \cdot \ell$.

4. a. $W_\ell(\vec{R}) = W_\ell(\vec{R}_n) + W_\ell(\vec{f}) = W_\ell(\vec{f})$.
Le travail de la réaction du support se réduit au travail de la force de frottement.
b. En l'absence de frottement, la réaction d'un support ne travaille pas.

14 1.



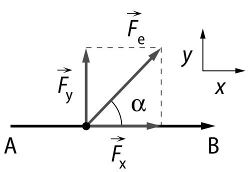
2. a. $W(\vec{f}_2)$ est positif alors que $W(\vec{f}_1)$ et $W(\vec{f}_{air})$ sont négatifs.
La force $\vec{f}_2$ est exercée dans la même direction et dans le même sens que le déplacement.
b. $\vec{f}_2$ est la seule composante de $\vec{R}_2$ qui fournit un travail. Ce travail est moteur.

3. Le point d'application de la force ne se déplace pas : le travail est nul.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

15 1. $W_{AB}(\vec{F}_e) = F_e \cdot AB \cdot \cos\alpha$.

2. a.



b. $F_x = F_e \cdot \cos\alpha$ et $F_y = F_e \cdot \sin\alpha$.

c. La composante $\vec{F}_x$ favorise le mouvement car elle s'exerce dans la direction et dans le même sens que ceux du mouvement. $\vec{F}_y$ n'a aucun effet sur le mouvement car s'exerce perpendiculairement au déplacement.
d. $W_{AB}(\vec{F}_x) = \vec{F}_x \cdot \vec{AB} = F_x \cdot AB = F_e \cdot AB \cdot \cos\alpha$
et $W_{AB}(\vec{F}_y) = \vec{F}_y \cdot \vec{AB} = 0$.

3. $W_{AB}(\vec{F}_e) = W_{AB}(\vec{F}_x) + W_{AB}(\vec{F}_y) = W_{AB}(\vec{F}_x)$.

Le travail d'une force $\vec{F}$ lors du déplacement de son point d'application est égal à la somme des travaux de ses composantes $\vec{F}_x$ et $\vec{F}_y$ et se réduit au travail de la composante tangentielle $\vec{F}_x$ au déplacement.
$W_{AB}(\vec{F}_e) = F_x \cdot AB$ et $F_x = F_e \cdot \cos\alpha$ donc :

$$W_{AB}(\vec{F}_e) = F_e \cdot AB \cdot \cos\alpha.$$

16 ***Un vol en parapente***

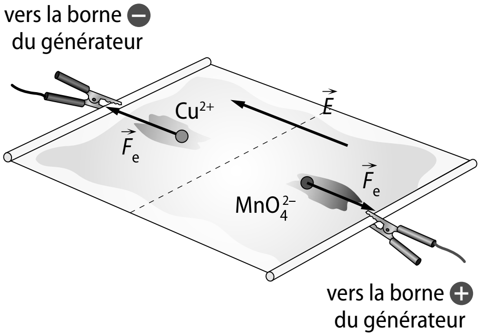
Un parapentiste s'élance du sommet du Puy Mary à l'altitude z_1 = 1 520 m pour un vol d'un dénivelé h = 506 m. La masse du parapentiste et de son matériel vaut m = 82,5 kg.

1. *Donner l'expression du travail de la force de pesanteur en fonction des données de l'énoncé. Calculer sa valeur.*
Soit z_2 l'altitude du point d'arrivée.
$W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_1 - z_2) = m \cdot g \cdot h$.
$W(\vec{P}) = 4{,}10 \times 10^5$ J.

Au cours de son vol, emporté par un courant atmosphérique ascendant, le parapentiste atteint une altitude z = 1 753 m.

2. a. *Le travail de la force de pesanteur au cours de ce déplacement en est-il modifié ? Justifier la réponse.*
La réponse est identique. Le travail de la force de pesanteur lors du déplacement de son point d'application entre deux points dépend de la différence d'altitude entre ces deux points.
b. *La même réponse est-elle transposable au travail des forces de frottement dues à l'air ?*
La réponse n'est pas transposable au travail d'une force de frottement car sa valeur dépend du chemin suivi par le point d'application.

17 1.



2. a. E s'exprime en V · m^{-1}, U_{AB} en V et d = AB en m.
On en déduit $E = U_{AB}/AB$. D'où $E = 2{,}0 \times 10^2$ V · m^{-1}.
b. Pour chaque ion, le vecteur déplacement ($\vec{CA}$ ou $\vec{CB}$) et le vecteur force électrique $\vec{F}_e$ sont colinéaires et de même sens. De plus, CA = CB = AB/2, donc le travail de la force électrique s'écrit :

$$W_{CA}(\vec{F}_e) = W_{CB}(\vec{F}_e) = |q| \cdot E \cdot CB \cdot \cos\alpha = |q| \cdot E \cdot AB/2.$$

c. Avec $|q|$ = 2 e, $W_{CA}(\vec{F}_e) = W_{CB}(\vec{F}_e) = 3{,}2 \times 10^{-18}$ J.
d. Le travail fourni est moteur dans les deux cas. Il favorise le mouvement.

3. Il s'agit d'un travail moteur dont la valeur vaut $W_{CB}(\vec{F}_e) = e \cdot E \cdot AB/2 = 1,6 \times 10^{-18}$ J.
Lors du déplacement d'une particule chargée, le travail de la force électrique exercée dépend de la charge électrique de la particule.

18 **1.** Le travail est résistant pour les déplacements AC_1, C_2B et AB.
Le travail est nul pour C_1B et AC_2.

2. a. $W_1(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AC_1} = -m \cdot g \cdot \ell$.
$W_2(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{C_2B} = -m \cdot g \cdot \ell$.
$W_3(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AB} = -m \cdot g \cdot \sqrt{2} \cdot \ell \cdot \cos\alpha$ avec $\alpha = 45°$.

b. $W_1(\vec{P}) = W_2(\vec{P}) = W_3(\vec{P}) = -2,21 \times 10^5$ J.

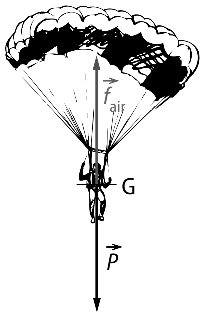
c. Il est indépendant du chemin suivi.

d. $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$.

3. a. $W_{BA}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$.

b. $W_{AA}(\vec{P}) = 0$ J.

19 **1. a.**



b. Soit AB le déplacement du point d'application G.
Par définition $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AB} = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$.
Ici, $z_A - z_B = 800$ m, donc :

$$W_{AB}(\vec{P}) = 75 \times 9,81 \times 800 = 5,9 \times 10^5 \text{ J.}$$

c. Dans le référentiel terrestre, considéré comme galiléen, la première loi de Newton permet d'écrire : $\vec{f}_{air} = -\vec{P}$, où $\vec{f}_{air}$ désigne les forces de frottement de l'air.
$W_{AB}(\vec{f}_{air}) = \vec{f}_{air} \cdot \overrightarrow{AB} = -\vec{P} \cdot \overrightarrow{AB} = -W_{AB}(\vec{P})$.
$W_{AB}(\vec{f}_{air}) = -5,9 \times 10^5$ J.

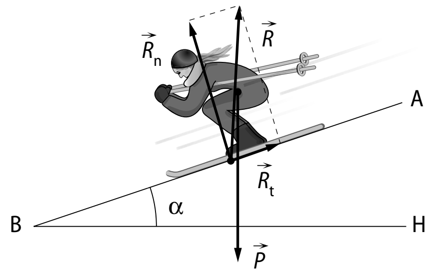
2. Le mouvement n'étant pas rectiligne uniforme, on ne peut pas appliquer la première loi de Newton.

20 **1. a.** Le fait que la vitesse est constante permet de l'affirmer. En effet, la résultante des forces exercées sur le skieur est nulle, ce qui n'est possible ici qu'en présence de frottement.

b. Le skieur est soumis à l'action des deux forces $\vec{P}$ et $\vec{R}$, et il se déplace à vitesse constante.
Dans le référentiel terrestre considéré comme Galiléen, la première loi de Newton permet d'écrire :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0} \text{ donc } \vec{P} = -\vec{R} \text{ et } P = R.$$

c. $R = P = m \cdot g = 7,11 \times 10^2$ N.
Échelle : 1 cm pour $3,5 \times 10^2$ N.



2. a. $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot AB = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$ où
$(z_A - z_B) = AH = AB \cdot \sin\alpha$
ou encore $\cos(\vec{P} \cdot \overrightarrow{AB}) = \cos(90° - \alpha) = \sin\alpha$.
$W_{AB}(\vec{P}) = 40 \times 9,81 \times 740 \times \sin 48,6° = 3,95 \times 10^5$ J.

b. La relation établie en **1. b.** permet d'écrire :

$$W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{R}) = 0, \text{ soit } W_{AB}(\vec{P}) = -W_{AB}(\vec{R}).$$

$W_{AB}(\vec{R}) = -3,95 \times 10^5$ J.

3. a. Voir ci-dessus.

b. La composante tangentielle $\vec{R}_t$ représente la force de frottement $\vec{f}$ de la piste.

c. Par projection de la relation $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ suivant la ligne de plus grande pente de la piste, on obtient :

$$f - P \cdot \sin\alpha = 0 \text{ soit } f = P \cdot \sin\alpha.$$

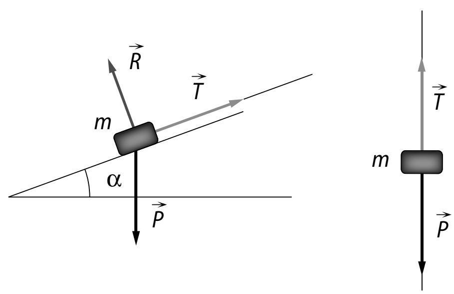
$W_{AB}(\vec{f}) = -f \cdot AB = -P \cdot \sin\alpha \cdot AB = -3,95 \times 10^5$ J.

d. $W_{AB}(\vec{f}) = W_{AB}(\vec{R}) = -W_{AB}(\vec{P})$.
La composante $\vec{R}_n$ étant perpendiculaire au déplacement, $W_{AB}(\vec{R}_n) = 0$, donc :

$$W_{AB}(\vec{R}) = W_{AB}(\vec{R}_n) + W_{AB}(\vec{R}_t) = W_{AB}(\vec{R}_t) = W_{AB}(\vec{f}).$$

Le résultat était donc prévisible.
Lors du déplacement d'un solide sur un support, le travail de la force exercée par le support sur le solide se réduit au travail de sa composante tangentielle, c'est-à-dire au travail de la force de frottement.

21 **1.** **hypothèse ⓐ** **hypothèse ⓑ**



2. a. Hypothèse ⓐ : $T_1 = P \cdot \sin\alpha$; Hypothèse ⓑ : $T_2 = P$.

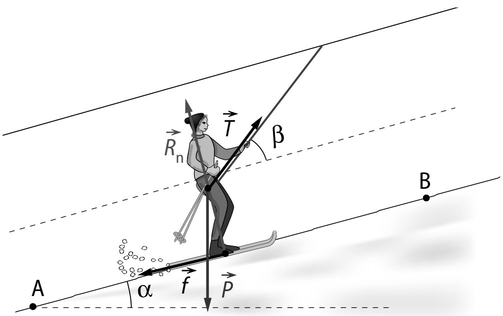
b. $T_1 = 10,4$ kN, soit la force exercée par 12 hommes.
$T_2 = 24,5$ kN, soit celle exercée par 28 hommes.

3. Hypothèse 1 : $W(\vec{R}) = 0$ J ; $W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h$;
$W(\vec{T}_1) = T_1 \cdot h/\sin\alpha = 4,9 \times 10^5$ J.
Hypothèse 2 : $W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h$; $W(\vec{T}_2) = T_2 \cdot h = 4,9 \times 10^5$ J.
On constate que $W(\vec{T}_2) = W(\vec{T}_1)$ est aussi égal à :

$$(-W(\vec{P})) = m \cdot g \cdot h.$$

4. a. La valeur de la force de traction à fournir est plus faible avec la première technique mais doit être exercée sur une distance importante. La seconde technique nécessite quant à elle une force plus grande mais exercée sur un déplacement plus court.
b. Pas vraiment car le travail à fournir est identique quelle que soit la technique utilisée.
c. D'après l'hypothèse d'un architecte, J.-C. Houdin, un couloir interne construit juste sous la surface de la pyramide aurait permis de monter les blocs de pierre jusqu'au sommet.

22 **1. a.** Le skieur est soumis à l'action de la force de pesanteur $\vec{P}$, à la force de traction $\vec{T}$, à la réaction $\vec{R}$ de la piste décomposable en une réaction normale $\vec{R}_n$ à la piste et une force de frottement $\vec{f}$.



b. Dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen, l'application de la première loi de Newton amène :

$$\Sigma\vec{F}_{ext} = \vec{0}.$$

c. $W_{AB}(\Sigma\vec{F}_{ext}) = \Sigma\vec{F}_{ext} \cdot \overrightarrow{AB} = 0.$

2. $\vec{T}$ fournit un travail moteur, $\vec{R}_n$ ne travaille pas, $\vec{f}$ et $\vec{P}$ fournissent un travail résistant.

3. a. En notant A le bas de la piste, B le sommet, on a :

$$z_A - z_B = - L \cdot \sin\alpha = - 112 \text{ m}.$$

b. $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = - 9{,}43 \times 10^4$ J.
$W_{AB}(\vec{T}) = T \cdot AB \cdot \cos\beta = 1{,}12 \times 10^5$ J.
$W_{AB}(\Sigma\vec{F}_{ext}) = \Sigma W_{AB}(\vec{F}_{ext})$
$= W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{T}) + W_{AB}(\vec{f}) = 0.$
$W_{AB}(\vec{f}) = - W_{AB}(\vec{P}) - W_{AB}(\vec{T}) = - 1{,}75 \times 10^4$ J.

c. $W_{AB}(\vec{f}) = - f \cdot L$, donc $f = 58{,}2$ N.

23 **1. a.** $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_0 - z)$. Or $z_0 = - \ell \cdot \cos\alpha_0$ et $z = - \ell \cdot \cos\alpha$ donc $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot (\cos\alpha - \cos\alpha_0)$.
b. $\alpha < \alpha_0$ donc $\cos\alpha > \cos\alpha_0$ et $W(\vec{P}) > 0$: le travail est moteur.
c. $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot (1 - \cos\alpha_0) = 2{,}30 \times 10^{-1}$ J.

2. a. $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot (\cos\alpha_0 - 1) = -2{,}30 \times 10^{-1}$ J.
b. Le travail est nul.

3. À chaque instant, cette force est perpendiculaire au déplacement de son point d'application. Elle ne travaille pas.

24 **1.** $v_B = \ell/\Delta t$, soit :

$$v_B = 5{,}0 \times 10^{-2}/(35{,}7 \times 10^{-3}) = 1{,}4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$\Delta E_C = E_{c(B)} - E_{c(A)} = 1/2 \cdot m \cdot (v_B^2 - v_A^2)$
$\Delta E_C = - 2{,}2 \times 10^{-1}$ J.

2. $z_A - z_B = - L \cdot \sin\alpha$.
Donc $W_{AB}(\vec{P}) = - m \cdot g \cdot L \cdot \sin\alpha$
$W_{AB}(\vec{P}) = - 2{,}2 \times 10^{-1}$ J.

3. a. On constate que $W_{AB}(\vec{P}) = \Delta E_C$.
b. Les forces de frottement ne travaillent pas.

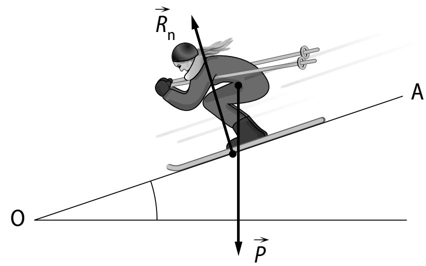
25 **1.** $E_{ppA} = m \cdot g \cdot h = 1{,}10 \times 10^4$ J.

2. a. Sans frottement, il y a transformation d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique.
$E_{cO} = E_{ppA} = 1{,}10 \times 10^4$ J donc :

$$v_O = 17{,}1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 61{,}8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

b. $\Delta E_c = E_{cO} - E_{cA} = 1{,}10 \times 10^4$ J.
c. $E_m = E_c + E_p$ se conserve car le mobile n'est soumis à aucun frottement.

3. a. Le snowboarder est soumis à l'action de la force de pesanteur $\vec{P}$ et à la réaction $\vec{R}$ de la piste décomposable en une réaction normale $\vec{R}_n$ unique.



b. $W_{AB}(\vec{R}_n) = 0$ et $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h = 1{,}10 \times 10^4$ J.
c. $W_{AB}(\vec{P}) = - \Delta E_{pp}$.
d. $W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{R}_n) = \Sigma W_{AB}(\vec{F}_{ext}) = 1{,}10 \times 10^4 \text{ J} = \Delta E_c$.
La variation d'énergie cinétique du snowboarder en translation entre deux points A et B est égale à la somme des travaux des forces extérieures qui lui sont appliquées entre ces deux points. Un travail traduit donc une variation d'énergie.

4. a. E_m ne se conserve pas mais diminue.
b. $\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c$ et ΔE_{pp} reste la même que précédemment donc ΔE_c est plus faible.

5. a. $\Sigma W_{AB}(\vec{F}_{ext}) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{R}_n) + W_{AB}(\vec{f}) = \Delta E_c$ donc :

$$W_{AB}(\vec{f}) = \Delta E_c - W_{AB}(\vec{P}).$$

b. $W_{AB}(\vec{f}) = 1/2 \cdot m \cdot v^2 - m \cdot g \cdot h$ donc :

$$W_{AB}(\vec{f}) = - 6{,}37 \times 10^3 \text{ J}.$$

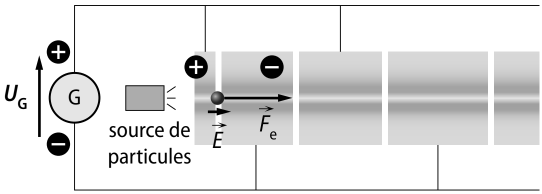
6. $\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c = - 1{,}10 \times 10^4 + 4{,}63 \times 10^3$
$= - 6{,}37 \times 10^3 \text{ J} = W_{AB}(\vec{f})$.

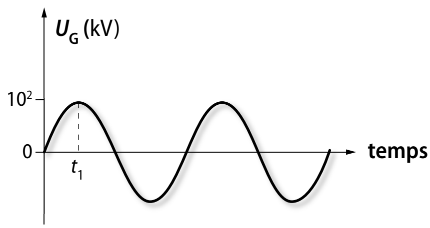
7. L'énergie mécanique d'un solide se conserve lorsqu'aucune force extérieure autre que le poids ne travaille. Lorsque d'autres forces extérieures travaillent, la variation d'énergie mécanique est égale à la somme des travaux des forces extérieures autres que le poids.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

26 **1.** Il permet que deux tubes successifs soient toujours à des potentiels de signe opposé.

2. a. et **c.**





b. Le tube 1 doit porter un potentiel positif, le tube 2 un potentiel négatif.

3. a. Voir sur le schéma.

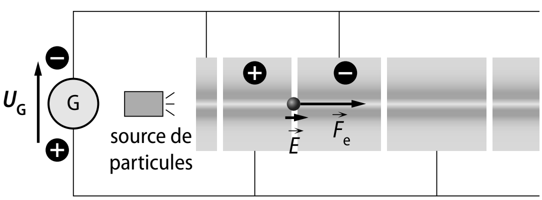
b. $E = U_G/L = 1{,}0 \times 10^5/(2{,}0 \times 10^{-2}) = 5{,}0$ MV · m^{-1} et $F_e = e \cdot E = 8{,}0 \times 10^{-13}$ N.

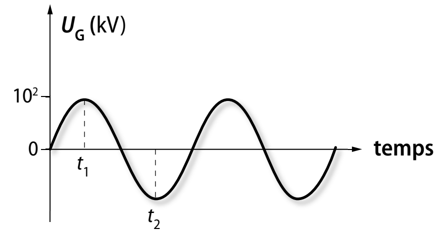
c. La vitesse de la particule est orientée selon l'axe des tubes et présente donc le même sens que :

$$\vec{F}_e \cdot W(\vec{F}_e) = F_e \cdot L = 1{,}6 \times 10^{-14} \text{ J.}$$

d. $\Delta E_c = W(\vec{F}_e)$. Or la vitesse initiale est négligeable, donc $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2 = F_e \cdot L$, soit $v = \sqrt{(2 \cdot F_e \cdot L/m)}$.
$v = 4{,}4 \times 10^6$ m · s^{-1}.

4. a. et **b.**





c. La durée de vol $\Delta t = T/2 = 1/(2\,f) = 2{,}0 \times 10^{-8}$ s.

d. La longueur du premier tube est donc :

$$d = v \cdot T/2 = 8{,}8 \times 10^{-2} \text{ m} = 8{,}8 \text{ cm.}$$

5. a. Lors de son passage dans les cavités accélératrices successives, la vitesse v de la particule augmente sous l'action du travail de la force électrique. En revanche, la période T du signal produit par le générateur restant constante, il faut alors allonger les tubes pour que l'accélération reste efficace.

b. Le travail de la force électrique exercée sur le proton dans chaque cavité s'écrit :

$$W(\vec{F}_e) = F_e \cdot L = q \cdot E \cdot L = e \cdot U_G \cdot L/L = e \cdot U_G.$$

Pour n cavités, il vaut donc $n \cdot e \cdot U_G$. Il s'agit de l'énergie cinétique acquise par le proton (voir réponse **3.d.**).

c. $E_c = 12 \times 1{,}6 \times 10^{-19} \times 1{,}0 \times 10^5 = 1{,}9 \times 10^{-13}$ J
$= 1{,}2$ MeV.

d. $v = \sqrt{(2E_c/m)} = 1{,}5 \times 10^7$ m · s^{-1}, donc $v/c = 5{,}1$ %.

Dans l'approximation de 12 premiers tubes de 50 cm de longueur en moyenne, la distance de l'accélérateur permettant d'accélérer un proton jusqu'à $c/20$ doit être supérieure à 6 m. Pour s'approcher davantage de la célérité de la lumière, le plus grand accélérateur à protons situé à Los Alamos (USA) est long de 800 m. Il permet d'obtenir des protons d'énergie égale à 8 MeV.
Le plus grand accélérateur linéaire mesure 3,2 km et est situé à l'Université de Stanford aux États-Unis. Il atteint d'ailleurs les 50 GeV pour les électrons.

6. a. Aucune car le travail de la force électrique ne dépend que de q et U_G.

b. Les particules ne seraient pas accélérées car la force électrique ne travaillerait pas. $U_G = 0$ V lors du passage de la particule d'un tube à l'autre.

Transferts énergétiques

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Mesures du temps et oscillateur, amortissement.	– *Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence :* *• les différents paramètres influençant la période d'un oscillateur mécanique ;* *• son amortissement.*
– Énergie mécanique.	– Analyser les transferts énergétiques au cours d'un mouvement d'un point matériel.
– Étude énergétique des oscillations libres d'un système mécanique. – Dissipation d'énergie.	– *Pratiquer une démarche expérimentale pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un oscillateur.*

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Analyser des transferts énergétiques au cours de mouvements.
2. Faire une étude énergétique d'un oscillateur.
3. Mettre en évidence l'amortissement et la dissipation d'énergie.

Évaluation diagnostique *p. 198*

SITUATION 1

Cette situation permet d'effectuer un retour sur les différentes formes d'énergie caractérisant l'état d'un système mécanique abordées en Première S : l'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} et l'énergie cinétique E_c. Les élèves doivent être capables de rappeler les paramètres dont dépendent ses deux formes d'énergie, de préciser que l'E_{pp} emmagasinée par le wagonnet sera maximale au sommet d'une montagne russe alors que son E_c le sera lorsqu'il aura atteint sa vitesse maximale. L'**activité 1** est une étude de documents historiques permettant une première approche des transferts entre ces deux formes d'énergie lors du mouvement d'un mobile.

SITUATION 2

La plupart des élèves supposent que la masse du trapéziste, l'angle de déviation initial choisi et la longueur du trapèze vont modifier la durée des oscillations. L'**activité 2** est une démarche d'investigation qui permet de vérifier les hypothèses des élèves sur ce problème. Cette situation est l'occasion d'effectuer un retour sur les phénomènes périodiques, la définition d'une période ou encore la méthode permettant sa mesure avec une bonne précision abordées dès la classe de Seconde.

SITUATION 3

Cette situation permet de faire prendre conscience aux élèves :
– d'une part, que de multiples transferts entre les différentes formes d'énergie se produisent lors des oscillations d'un sauteur à l'élastique ;
– d'autre part, que ces transferts se produisent grâce au travail des forces mises en jeu (force de pesanteur, force de frottement, force exercée par l'élastique).
Les élèves pourront indiquer que l'énergie emmagasinée, avant le saut, sous forme potentielle de pesanteur est partiellement transférée, lors de la chute, sous forme cinétique grâce au travail du poids. Le travail des forces de frottements conduit à une dissipation de l'énergie du système vers le milieu extérieur.
On pourra faire remarquer que l'énergie cinétique acquise par le système entraîne ensuite une déformation de l'élastique. À son tour, l'élastique emmagasine de l'énergie. Cette situation est alors l'occasion d'introduire la notion d'énergie potentielle élastique, d'expliquer les termes *potentielle* et *élastique*. Le travail de la force (de rappel) exercée par le ressort sur le sauteur permet, lors de la remontée, un transfert d'énergie de la forme potentielle élastique vers la forme cinétique. L'**activité 3** est une activité expérimentale permettant de réaliser l'étude énergétique d'un oscillateur.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Les pendules de Galilée
p. 200

1. a. « Allées et venues » et « vibrations » sont les termes employés pour désigner les oscillations du pendule.
b. La période d'un pendule correspond à la durée d'un aller-retour.
c. Mesurer la durée de plusieurs oscillations permet de déterminer la valeur d'une période avec une précision « satisfaisante ». (L'incertitude Δt sur la mesure de durée effectuée étant divisée par le nombre de périodes prises en compte.)

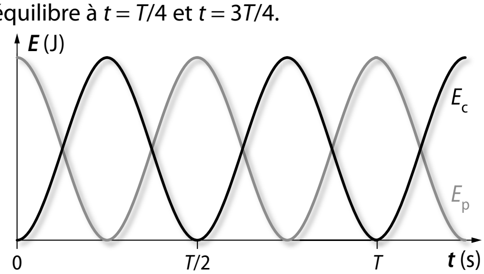
2. a. Galilée étudie l'influence de la masse du solide accroché au fil du pendule, de la longueur du fil. Il analyse également l'effet des frottements de l'air et l'effet de l'amplitude des oscillations.
b. La masse du pendule n'a pas d'influence sur la période des oscillations tout comme l'amplitude des oscillations même si elle diminue lorsque les frottements de l'air augmentent. La longueur du fil est le seul paramètre d'influence : lorsque la longueur du fil est doublée, la période est multipliée par quatre.

3. a. T_3 et T_4 peuvent être éliminés car T est indépendante de la masse m du pendule.
b. g, en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, est une accélération, quotient d'une vitesse par le temps $[g] = [v]/T = \text{L}/\text{T}^2$.
$[T_1] = \sqrt{L/(L \cdot \text{T}^{-2})} = \sqrt{\text{T}^2} = \text{T}$.
T_1 est homogène à une durée donc à une période.

4. $T = 2\,\pi\,\sqrt{(4 \times 0{,}573/9{,}81)} = 3{,}04$ s.

5. a. Le pendule constitué de la boule de liège est le plus amorti. L'amortissement se traduit par une diminution plus importante de l'amplitude des oscillations et de la vitesse du pendule.
b. Il est dû aux frottements de l'air.

6. a. Au départ (instant $t = 0$ s), le pendule est lâché sans vitesse initiale : $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2 = 0$ J. Au cours du mouvement, son énergie cinétique augmente progressivement, atteint son maximum lors du passage par la position d'équilibre puis, diminue et s'annule à nouveau lorsque le pendule atteint l'amplitude maximale à $t = T/2$. Le mouvement du pendule change de sens entre $T/2$ et T.
L'énergie potentielle de pesanteur dépend de la position du pendule. Elle est maximale à $t = 0$ s, $t = T/2$ et $t = T$; elle est minimale lors du passage par la position d'équilibre à $t = T/4$ et $t = 3T/4$.



b. Le pendule est soumis à l'action de la Terre (son poids) et à l'action du fil (la tension du fil). À chaque instant du mouvement, cette dernière force est perpendiculaire au déplacement de son point d'application : elle ne travaille donc pas. Le poids est donc la seule force qui fournit un travail.

7. La période des oscillations d'un pendule simple dépend de la longueur du fil constituant le pendule et de l'intensité de la pesanteur du lieu. Elle est indépendante de la masse du solide et de l'amplitude des oscillations (dans le cas d'écarts angulaires faibles).

8. Grâce au travail du poids, des transferts d'énergie se produisent lors des oscillations de pendule :
– de la forme potentielle de pesanteur à la forme cinétique lorsque le pendule descend ;
– de la forme cinétique à la forme potentielle lorsqu'il monte.

ACTIVITÉ 2

Période et amortissement d'un oscillateur mécanique
p. 201

1. On mesurera la durée Δt d'un nombre suffisant de périodes (par exemple $\Delta t = 10T$) pour avoir une bonne précision.

2. a. On pourra par exemple tester la longueur ℓ du fil, la masse m du pendule, l'angle initial de déviation θ. Il convient, pour réaliser l'étude, de fixer les paramètres, de n'en modifier qu'un seul et de mesurer la période T du pendule.
Pour l'influence de ℓ, on fixe m et θ, puis on modifie la longueur du fil. On pourra s'interroger sur le nombre de mesures qui permet raisonnablement de valider les observations.
Pour l'influence de m, on fixe ℓ et θ, et on modifie la masse du pendule.
Pour l'influence de θ, on fixe m et ℓ, et on modifie l'angle initial.

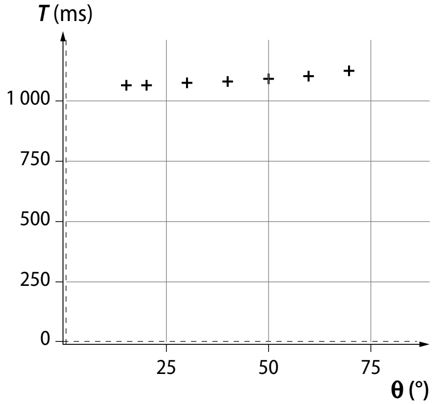
3. On pourra faire constater :
– l'influence de ℓ : quand ℓ augmente, T augmente ;
– l'influence de θ : pour des valeurs de θ faibles (inférieures à 40°), T est indépendant de θ ;
– l'influence de m : T est indépendant de m.

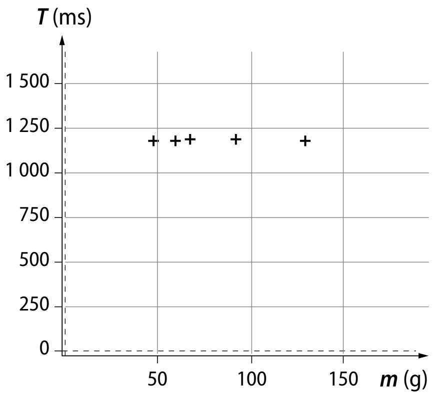
ℓ = 28 cm et m = 59,1 g							
θ (en °)	15	20	30	40	50	60	70
***T* (en s)**	1,069	1,069	1,079	1,081	1,092	1,105	1,127

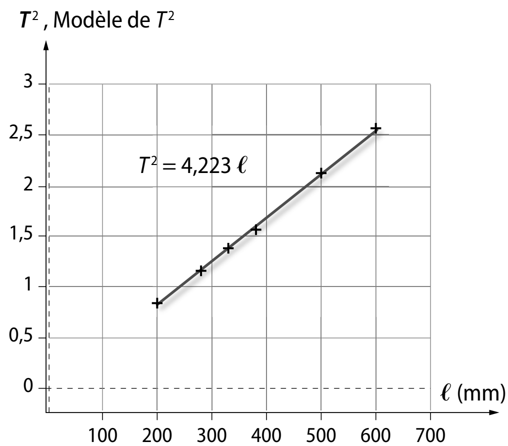
ℓ = 33 cm et θ = 30°					
***m* (en g)**	46,9	59,1	67,30	92,1	130
***T* (en s)**	1,182	1,177	1,183	1,190	1,170

$\theta = 30°$ et $m = 59{,}1$ g						
ℓ (en cm)	20	33	38	50	60	28
T (en s)	0,916	1,177	1,253	1,457	1,600	1,081

On pourra tracer $T = f(m)$; $T = f(\theta)$, $T = f(\ell)$ et $T^2 = f(\ell)$.

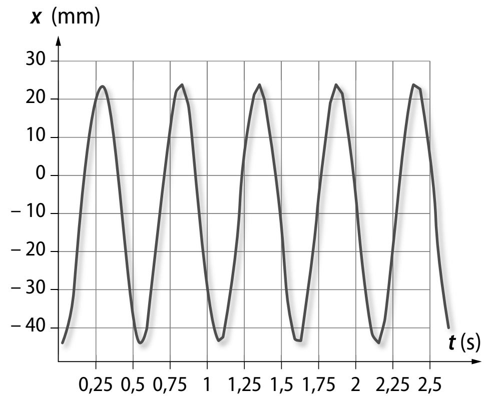






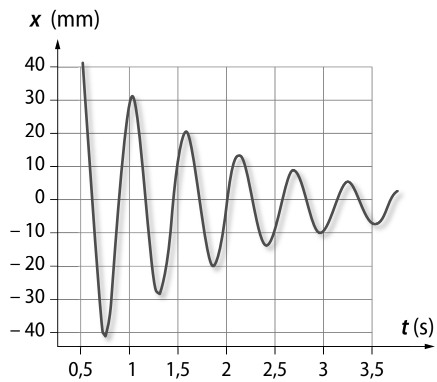
4. Il s'agit de filmer à la webcam les oscillations d'un pendule élastique vertical dans l'air, puis dans une éprouvette remplie d'eau (par exemple). On pourra augmenter la surface de contact du solide avec le fluide sans modifier sa masse ou encore ajouter des frottements de glissement entre les parois de l'éprouvette et le solide afin d'augmenter encore l'action des frottements.
Les enregistrements seront ensuite traités à partir d'un tableur grapheur afin d'étudier l'évolution de l'amplitude et de la période des oscillations selon les différentes conditions d'oscillations.
$m = 100$ g et $k = 13{,}5\ \mathrm{N \cdot m^{-1}}$.

5. Oscillations dans l'air



$T_1 = 0{,}53$ s et $x_{max} \approx 34$ mm

Oscillations dans l'eau



$T_2 = 0{,}55$ s et x_{max} diminue au cours du temps.

6. Si l'amplitude des oscillations ne dépasse pas une vingtaine de degrés, la période propre T_0 des oscillations est indépendante de leur amplitude. Elle est indépendante de masse du solide mais proportionnelle à la racine carrée de la longueur du fil.

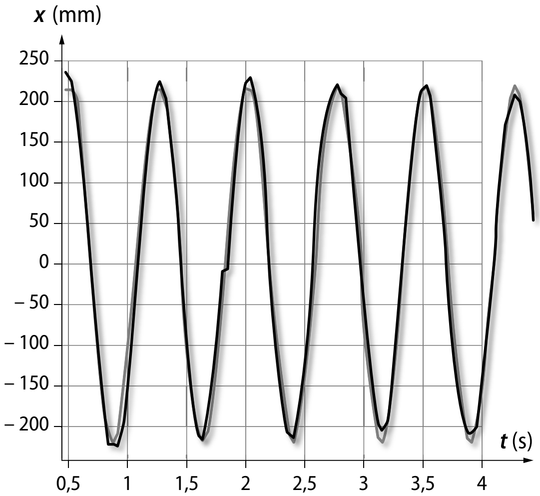
7. a. Les oscillations sont d'autant plus amorties que les frottements sont plus importants. Par exemple, les frottements exercés par un fluide sur le solide immergé augmentent avec la viscosité du fluide.
b. Quand on augmente les frottements, l'amplitude et le nombre des oscillations du solide diminuent rapidement. Tant que l'amortissement est assez faible (cas d'un liquide peu visqueux), la période (nommée pseudo-période) est pratiquement égale à la période propre du système

non amorti. Les oscillations s'amortissent lentement et le régime des oscillations est dit pseudo-périodique.
Si les frottements deviennent trop importants (cas d'un liquide très visqueux ou de frottements de glissement), les oscillations s'amortissent plus rapidement. Le solide, écarté de sa position d'équilibre, y retourne sans osciller : c'est le régime apériodique. Le régime critique correspond au régime apériodique pour lequel le système revient le plus rapidement possible à son état d'équilibre.

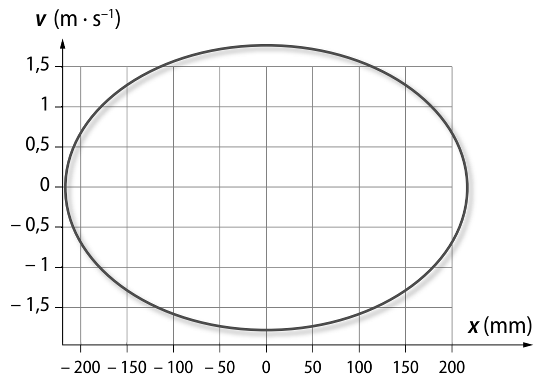
ACTIVITÉ 3

Se peser dans l'espace *p. 202*

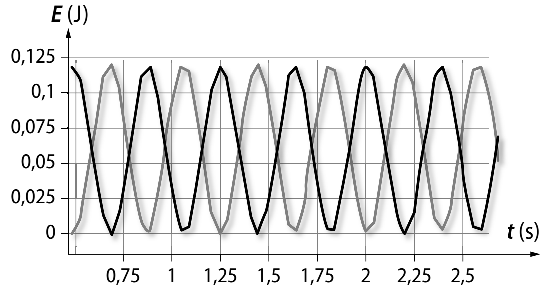
On prend ici les valeurs suivantes.
Masse m du mobile apparaissant sur la vidéo : $m = 77{,}0$ g.
Constante de raideur k d'un ressort : $k = 2{,}5\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$.



1. a. Le mobile oscille horizontalement autour d'une position d'équilibre en décrivant un mouvement de translation rectiligne.
b. $x_m = 218 \times 10^{-3}$ m et $T = 7{,}5 \times 10^{-1}$ s.
c. $T \approx T_0 = 7{,}4 \times 10^{-1}$ s.



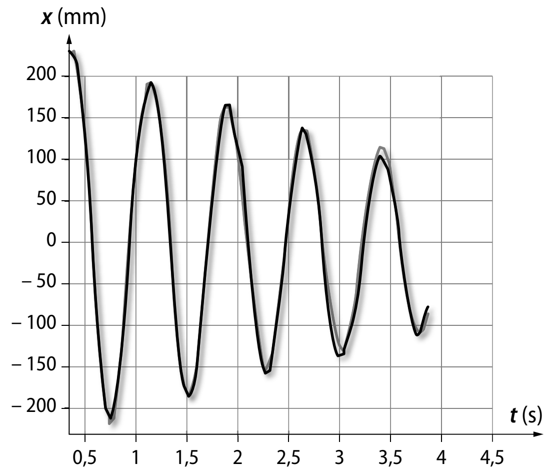
2. La vitesse est maximale ($v_G = 1{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) aux instants pour lesquels le mobile passe par sa position d'équilibre ($x_G = 0$ m). Elle est nulle ($v_G = 0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) aux instants où il passe par l'une de ses positions extrêmes ($x_G = \pm\, x_m$).



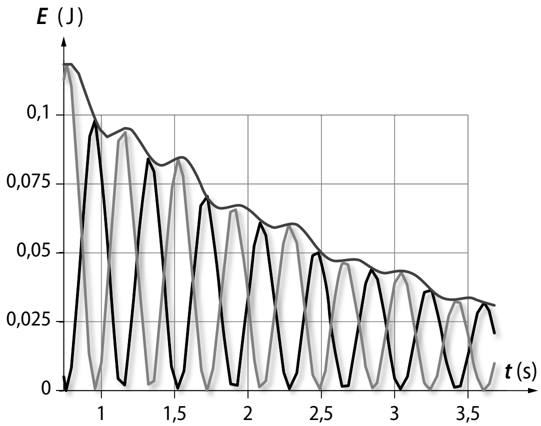
3. a. Au départ, l'énergie du système est emmagasinée sous la forme potentielle élastique. E_{pe} est maximale et E_c minimale et nulle à $t_0 = 0{,}5$ s.
À $t = t_0 + T/4 = 0{,}69$ s, E_{pe} est minimale et nulle, et E_c maximale.
b. Au cours de la durée $\Delta t = T/4$, l'énergie cinétique du système augmente $\Delta E_c = +\,1{,}16 \times 10^{-1}$ J alors que son énergie potentielle élastique diminue $\Delta E_{pe} = -\,1{,}16 \times 10^{-1}$ J. L'énergie mécanique se conserve : $\Delta E_m = 0$ J.
c. Il y a transfert d'énergie potentielle élastique en énergie cinétique.

4. a. Entre les instants $t = T/4 = 0{,}69$ s et $t = T/2 = 0{,}87$ s, il y a transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle élastique.
b. L'énergie mécanique se conserve : $\Delta E_m = 0$ J.

Évolution de l'élongation du centre d'inertie du mobile au cours du temps



Évolution des énergies cinétique, potentielle élastique et mécanique du mobile au cours du temps



5. a. La baisse de la soufflerie entraîne l'apparition de frottements non négligeables entre le mobile et le banc.
b. Les oscillations s'amortissent lentement et le régime des oscillations devient pseudo-périodique.

6. La mesure de la pseudo-période T des oscillations du système oscillant « siège + astronaute » permet de déterminer la masse m_2 de l'astronaute (la masse du siège m_1 et la constante de raideur k' des deux ressorts étant connus).
$T \approx T_0 = 2\,\pi \cdot \sqrt{(m/k)}$ avec $m = m_1 + m_2$ et $k = 2k'$.
Remarque : dans le cas où k n'est pas connu précisément, la mesure des périodes T_1 (oscillations du siège vide) et T_2 (oscillations de l'astronaute sur le siège) permettent de déterminer la masse m_2 de l'astronaute. $T_1 = 2\pi\sqrt{(m_1/k')}$ et $T_2 = 2\pi\sqrt{(m/k')}$ amènent $m_2 = (T_2^2/T_1^2 - 1) \cdot m$.

7. a. En présence de frottements, l'amplitude et le nombre des oscillations du mobile diminuent. La période (nommée pseudo-période) est proche de la période propre du système non amorti.
b. En présence de frottements, les transferts d'énergie successifs entre les formes cinétique et potentielle élastique ne s'effectuent pas sans pertes. L'énergie mécanique ne se conserve pas et une partie de l'énergie est transférée sous forme thermique au milieu extérieur : il y a dissipation d'énergie.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *Analyser les transferts énergétiques au cours de mouvements*

1 **1. c.**
2. d.
3. a.

2 **1.** **d**. **2.** **c**. **3.** **a**. **4.** **b**.

3 **1.** À $t = 0$ s, le projectile étant immobile, $E_c(0) = 1/2 \cdot m \cdot v^2 = 0$ J. Au cours du mouvement, l'énergie cinétique du projectile augmente car sa vitesse augmente. La courbe ❷ représente donc la variation de l'énergie cinétique.
Au cours de sa chute rectiligne et verticale, l'altitude z du projectile diminue : $E_{pp} = m \cdot g \cdot z$ diminue au cours du mouvement. La courbe ❸ représente donc la variation de l'énergie potentielle de pesanteur.
La courbe ❶ représente donc celle de l'énergie mécanique $E_m = E_c + E_{pp}$.
2. a. À $t = 0$ s, $z = z_0 = 10$ m, donc $E_{pp}(0) = 78{,}5$ J.
b. D'après la courbe ❸, à la fin de la chute $E_{pp}(\mathrm{f}) = 0$ J.
$\Delta E_{pp} = E_{pp}(\mathrm{f}) - E_{pp}(0) = -78{,}5$ J.
c. Par définition, lors du déplacement du centre d'inertie du projectile entre ses deux positions aux instants $t = 0$ s et $t = t_{\mathrm{final}}$: $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_0 - z_f)$.
$W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot z_0 - m \cdot g \cdot z_f = E_{pp}(0) - E_{pp}(\mathrm{f}) = -\Delta E_{pp}$.
3. a. À $t = 1{,}4$ s.
b. $E_c(\max) = E_c(\mathrm{f}) = 78{,}5$ J. $\Delta E_c = E_c(\mathrm{f}) - E_c(0) = 78{,}5$ J car $E_c(0) = 0$ J.
c. Seule l'action de la Terre agit sur le projectile lors de sa chute. On constate :
$$\Delta E_c(\mathrm{AB}) = -\Delta E_{pp}(\mathrm{AB}) = W(\vec{P}).$$
$\Delta E_c = W(\vec{P}) = 78{,}5$ J.
4. a. Lors de la chute libre d'un projectile, l'énergie potentielle de pesanteur, maximale au départ, est progressivement et entièrement libérée sous forme d'énergie cinétique.
b. $v = \sqrt{2} \cdot E_c/m = 14{,}0\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.
5. $\Delta E_c = -\Delta E_{pp}$.
Les variations d'énergie cinétique et potentielle se compensent : $\Delta E_c + \Delta E_{pp} = 0$.
L'énergie mécanique du projectile est conservée :
$$\Delta E_c + \Delta E_{pp} = \Delta E_m = 0.$$
L'énergie mécanique reste donc constante au cours du temps.
$$E_m(t) = E_m(0) = E_m(\mathrm{f}) = E_{pp}(0) = E_c(\mathrm{f}) = 78{,}5 \text{ J}.$$

4 **1.** $E_{m(\mathrm{initiale})} = 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = 3{,}6$ J.
2. a. En l'absence de frottement, l'E_m se conserve :
$$E_{m(\mathrm{finale})} = E_{m(\mathrm{initiale})} = 3{,}6 \text{ J}.$$
b. Au sommet de la trajectoire, la vitesse de la balle est nulle. Soit z_{max} l'altitude maximale atteinte par la balle.
$E_{m(\mathrm{finale})} = 1/2 \cdot m \cdot v_{\mathrm{sommet}}^2 + m \cdot g \cdot z_{max} = m \cdot g \cdot z_{max}$
$1/2 \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot z_{max}$ donc :
$$z_{max} = h + 1/2 \cdot v_0^2/g = 8{,}2 \text{ m}.$$
3. $1/2 \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = 1/2 \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z$ donc :
$$z = h + (v_0^2 - v^2)/(2 \cdot g) = 7 \text{ m}.$$

5 **1.** $E_{cf} = (1/2)\, m \cdot v_f^2 = 0{,}5 \times 9{,}5 \times 10^{-3} \times (260/3{,}6)^2$
$= 2{,}5 \times 10^7$ J.

2. Ce catapultage permet un transfert d'énergie potentielle élastique (emmagasinée dans la catapulte) en énergie cinétique.

3. On note x l'allongement du ressort :

$$E_m = (1/2)\ m \cdot v^2 + (1/2)\ k \cdot x^2.$$

4. En l'absence de frottement, l'énergie mécanique se conserve : $E_m = E_{cf} = E_{pe(initiale)}$.
$(1/2)\ m \cdot v_f^2 = (1/2)\ k \cdot \ell^2$,
donc $k = m \cdot (v_f/\ell)^2 = 8{,}8 \times 10^3\ N \cdot m^{-1}$.

COMPÉTENCE 2 : *Effectuer l'étude énergétique d'un oscillateur*

6 **1.** *Faux*. Seules trois oscillations apparaissent entièrement.

2. *Vrai*.

3. a. *Faux*.
$E_{pe} = (1/2)\ k \cdot x_m^2 = 0{,}5 \times 3{,}0 \times 4^2 \times 10^{-4} = 2{,}4$ mJ.
b. *Vrai*.
c. *Vrai*.

4. a. *Faux*. E_c est maximale lorsque le jouet passe par la position d'équilibre.
b. *Vrai*. $x = 0$ cm, donc $E_{pe} = 0$ J.

5. a. *Faux*. C'est l'inverse.
b. *Vrai*. E_{pe} en E_c, puis E_c en E_{pe}, puis E_{pe} en E_c, puis E_c en E_{pe}.

7 **1.** Oscillateur mécanique : système mécanique évoluant de façon périodique (ou presque) autour d'une position d'équilibre.

2. Période propre : durée séparant deux passages successifs du système par une position donnée et dans le même sens.

3. La verticale.

4. L'amplitude.

8 ***Saut à l'élastique***
Lors d'un saut à l'élastique les amateurs de sensations fortes subissent de nombreuses oscillations autour d'une position d'équilibre. Indiquer l'ordre dans lequel se produisent les transferts énergétiques suivants :
a. *énergie cinétique en énergie potentielle de pesanteur ;*
b. *énergie cinétique en énergie potentielle élastique ;*
c. *énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique ;*
d. *énergie potentielle élastique en énergie cinétique.*

c. ; **b.** ; **d.** ; **a.** ; **c.**…

10 **1.** t : temps ; z_G : altitude du centre d'inertie du pendule ; θ : élongation du pendule ; v_G : vitesse du centre d'inertie ; E_c : son énergie cinétique ; E_{pp} : son énergie potentielle de pesanteur ; E_m : son énergie mécanique.

2. a. Dans le repère (O ; x, y, z) choisi pour repérer les positions du centre d'inertie de la sphère, les altitudes z_G repérées sont négatives.

b.

t (s)	0	0,08	0,2	0,36
z_G (cm)	– 22,0	– 27,4	– 31,9	– 24,4
θ (°)	46,4	31,5	– 0,75	– 40
v_G (m · s^{-1})	0	1,03	1,40	0,71
E_c (mJ)	0	32	59	15
E_{pp} (mJ)	– 129	– 161	– 188	– 144
E_m (mJ)	– 129	– 129	– 129	– 129

3. a. L'énergie mécanique se conserve.
b. Il y a transfert d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique (entre $t = 0$ s et $t \approx 0{,}2$ s) puis d'énergie cinétique en énergie potentielle de pesanteur (entre $t \approx 0{,}2$ s et $t = 0{,}36$ s).

COMPÉTENCE 3 : *Mettre en évidence l'amortissement et la dissipation d'énergie*

11 **1.** L'amortissement est dû à la présence de forces de frottement non négligeables.

2. L'amortissement entraîne une diminution de l'amplitude des oscillations au cours du temps.

3. Régime pseudo-périodique.

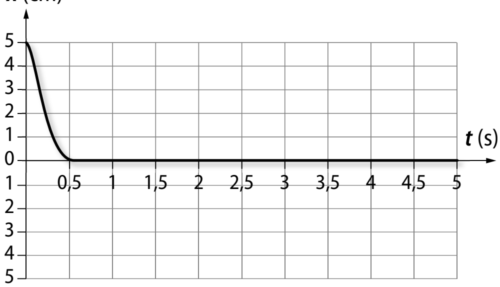
4. Pseudo-période : durée séparant deux passages successifs du système par sa position d'équilibre et en variant dans le même sens.

5. À condition que l'amortissement reste faible.

12 **1. a.** ❶ : régime pseudo-périodique. ❷ : régime périodique.
b. Initialement, le centre d'inertie du système est décalé de 5 cm par rapport à sa position d'équilibre.
c. Sur le graphe, on mesure une longueur de 24,0 mm pour 5 pseudo-périodes T_1 et 29,0 mm pour 6 périodes propres T_2. 4 s correspondent à 24,0 mm pour le graphe ❶ et 5 s à 32,0 mm pour le graphe ❷.
La pseudo-période est $T_1 = 0{,}80$ s (pour le régime pseudo-périodique). La période propre est $T_2 = 0{,}76$ s (pour le régime périodique).

2. a. Dans le cas ❶ (régime pesudo-périodique) : les oscillations sont amorties car leur amplitude diminue progressivement au cours du temps.
b. L'amortissement des oscillations augmenterait. Leur nombre et leur amplitude diminueraient alors que la valeur de la pseudo-période augmenterait encore.
Lorsque les frottements deviennent trop importants, le régime devient apériodique : le centre d'inertie du système reprend sa position d'équilibre sans osciller.

c.



14 **1. a.** Les énergies potentielle, cinétique et mécanique varient au cours du temps dans le premier cas. Dans le second, seules les énergies potentielle et cinétique varient. E_m reste constante.
b. Il y a des transferts successifs d'énergie potentielle en énergie cinétique et inversement dans les deux cas. Dans le cas ❶, ces transferts s'accompagnent aussi d'une dissipation d'énergie.
c. Entre $t = 0$ s et $t = 2$ s, $\Delta E_m = -30$ mJ dans le cas ❶ et $\Delta E_m = 0$ dans le cas ❷.

2. La présence de frottements entraîne une diminution de l'énergie mécanique.

3. Lorsque les oscillations sont amorties, le régime est pseudo-périodique (graphe ❶), dans le cas contraire il est périodique (graphe ❷).

15 **1. a.** En l'absence de frottements lors de la descente, l'énergie potentielle est entièrement convertie en énergie cinétique. Ainsi $1/2 \cdot m \cdot v^2_{max} = m \cdot g \cdot h$ soit :

$$v_{max} = \sqrt{(2 \cdot g \cdot h)} = 31{,}3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. $v_{max} < v_G$. L'énergie potentielle de pesanteur initiale n'est pas complètement transférée en énergie cinétique. Il y a dissipation d'énergie.

2. a. $E_{dissipée} = m \cdot g \cdot h - 1/2 \cdot m \cdot v^2$
$= 10{,}5$ kJ.
$E_{dissipée} = E_{pp(initiale)} - E_{c(finale)}$.
b. Cette dissipation est due au travail de forces de frottements liées à l'air et à la piste glacée. Il s'agit de réduire les frottements en adoptant une position aérodynamique et en réduisant les frottements entre les skis et la glace.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

16 **1.** *Faux*. Initialement, E_c est maximale (la vitesse du ballon est maximale), E_{pp} est nulle (son altitude est nulle, elle correspond à celle de l'origine choisie) et $E_m = E_{c(max)}$.

2. *Vrai*.

3. *Faux*. À $t = t_2$, E_c est minimale mais non nulle, E_{pp} est maximale et $E_m = E_{pp(max)} + E_{c(min)}$.

4. *Vrai*.

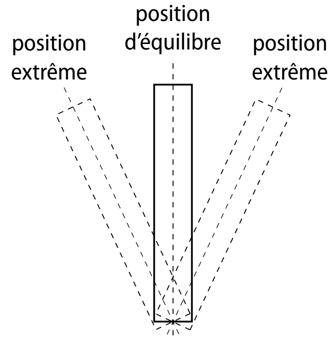
5. *Faux*. Graphiquement, E_m = constante. Il y a conservation de l'énergie mécanique, donc le travail qui modélise l'action des frottements est négligeable.

6. *Vrai*.

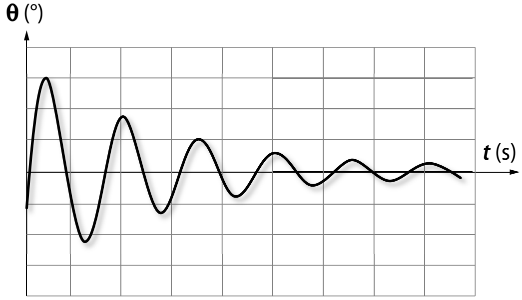
7. *Vrai*.

8. *Faux*. Il y a un transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle entre $t = 0$ s et $t = t_2$, puis d'énergie potentielle en énergie cinétique.

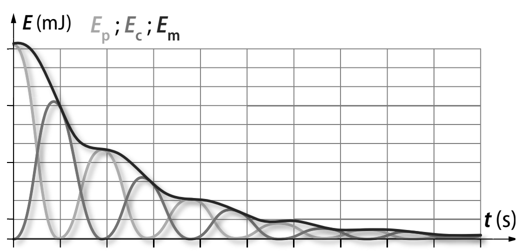
17 **1. a.** et **b.**



2. a. Il s'agit d'oscillations amorties.
b.



3. a. Il se produit une succession de transferts d'énergie cinétique en énergie potentielle élastique et inversement.
b. Au cours des oscillations, l'énergie cinétique est maximale à l'instant du passage par la position d'équilibre, l'énergie potentielle élastique à l'instant du passage par une position extrême.
c.



4. a. Leur rôle est d'amortir les oscillations en dissipant progressivement l'énergie mécanique de l'oscillateur.

Ces systèmes permettent de diminuer progressivement l'amplitude des oscillations au cours du temps afin que l'oscillateur n'effectue que quelques oscillations avant de reprendre sa position d'équilibre.
b. De lourdes masses sont placées aux derniers étages des gratte-ciel et oscillent à la même fréquence que la tour mais en sens opposé afin de réduire l'amplitude des oscillations.

18 ***Amortissement***
Les enregistrements suivants représentent les mouvements de quatre solides différents accrochés à un même ressort de constante de raideur $k = 10$ N · m^{-1}.

1. *Pour chaque enregistrement :*
a. *mesurer l'élongation initiale des oscillations ;*
ⓐ : $x_0 = -5{,}0$ cm ; ⓑ : $x_0 = +10{,}0$ cm ; ⓒ : $x_0 = +8{,}0$ cm ; ⓓ : $x_0 = -2{,}5$ cm.
b. *en déduire l'énergie potentielle élastique emmagasinée initialement ;*
ⓐ : $E_{pp0} = 1{,}25 \times 10^{-2}$ J ; ⓑ : $E_{pp0} = 5{,}00 \times 10^{-2}$ J ;
ⓒ : $E_{pp0} = 3{,}20 \times 10^{-2}$ J ; ⓓ : $E_{pp0} = 3{,}12 \times 10^{-3}$ J.
c. *indiquer s'il s'agit d'oscillations amorties ou non amorties et qualifier le mouvement décrit par le solide ;*
ⓐ ; ⓑ ; ⓓ sont des oscillations amorties ; ⓒ non amorties.
ⓐ et ⓑ : mouvement pseudo-périodique ; ⓓ : mouvement apériodique ; ⓒ : mouvement périodique.
d. *déterminer, le cas échéant, la période propre ou pseudo-période du phénomène.*
$T_{0ⓒ} = 1{,}0$ s ; $T_{ⓐ} = 0{,}75$ s ; $T_{ⓑ} \approx 0{,}7$ s.

2. *Classer des oscillateurs par amortissement croissant.*
ⓒ - ⓐ - ⓑ - ⓓ.

19 **1. a.** La période d'un phénomène s'exprime en s.
b. Une période propre a donc la dimension d'un temps. $[T_0] = \mathrm{T}$.
2. a. g est une accélération, quotient d'une vitesse par le temps : $[g] = [v]/\mathrm{T} = \mathrm{L}/\mathrm{T}^2$ en m · s^{-2}.
Le newton ($P = m \cdot g$) s'exprime donc en kg · m · s^{-2} :
$$[P] = \mathrm{M} \cdot \mathrm{L}/\mathrm{T}^2.$$
Ainsi N · m^{-1} = kg · m · s^{-2} · m^{-1} = kg · s^{-2}.
b. k s'exprime en N · m^{-1} ou en kg · s^{-2} soit :
$$[k] = \mathrm{M} \cdot \mathrm{L}/(\mathrm{T}^2 \cdot \mathrm{L}) = \mathrm{M} \cdot \mathrm{T}^{-2}.$$
La période propre T_0 dépend de m et k, relation qu'il est possible d'écrire sous la forme $T_0 = 2\pi \cdot m^a \cdot k^b$ avec a égal à 1, – 1/2 ou 1/2 et b égal à – 1, – 1/2 ou 1/2 d'après les propositions de l'énoncé.
Ainsi, $[T_0] = \mathrm{M}^a \cdot (\mathrm{M} \cdot \mathrm{T}^{-2})^b$ soit :
$$[T_0] = \mathrm{M}^a \cdot \mathrm{M}^b \cdot \mathrm{T}^{-2b} = \mathrm{M}^{a+b} \cdot \mathrm{T}^{-2b}.$$
Pour que $\mathrm{M}^{a+b} \cdot \mathrm{T}^{-2b}$ soit homogène à un temps T, il faut que $a + b = 0$ et $b = -1/2$ donc $a = -b = +1/2$.
L'expression de T_0 est de la forme :
$$T_0 = 2\pi \cdot m^{1/2} \cdot k^{-1/2} = 2\pi\sqrt{(m/k)}.$$
Le rapport $\sqrt{k/m}$ s'exprime donc en s^{-1} ($\sqrt{(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{s}^{-2}/\mathrm{kg})} = \mathrm{s}^{-1}$) ; le rapport m/k en s^2 (kg/kg · s^{-2} = 1/s^{-2} = s^2) et $\sqrt{m/k}$ en s ($\sqrt{(\mathrm{kg}/\mathrm{kg} \cdot \mathrm{s}^{-2})} = \sqrt{(1/\mathrm{s}^{-2})} = \mathrm{s}$).
Le rapport $\sqrt{m/k}$ est donc homogène à un temps.

20 **1.** La méthode consiste à mesurer sur les graphiques la longueur correspondant à plusieurs périodes d'une part, l'échelle de l'axe des temps d'autre part.
Sur le graphe, on mesure une longueur de 24,0 mm pour 5 T_1 et 29,0 mm pour 6 T_2.
4,0 s correspondent à 24,0 mm pour le graphe 1 et 5,0 s à 32,0 mm pour le graphe 2.
2. a. Deux chiffres significatifs.
b. L'appareil de mesure étant gradué au mm, l'incertitude $\Delta\ell$ sur la mesure est égale à la demi-plus petite graduation soit $\Delta\ell = 0{,}5$ mm.
c. Une erreur $\Delta\ell = 0{,}5$ mm modifie T de :
$$\Delta T = 0{,}076\,9 \text{ s} \approx 0{,}08 \text{ s pour } T_1$$
et $\Delta T = 0{,}078\,1$ s $\approx 0{,}08$ s pour T_2.
d. $0{,}72 \text{ s} < T_1 < 0{,}88$ s et $0{,}68 \text{ s} < T_2 < 0{,}84$ s.
e. $\Delta T_1/T_1 = 0{,}08/0{,}80 \approx \Delta T_2/T_2 = 0{,}08/0{,}76 = 10$ %.
La précision des mesures ne permet pas de différencier véritablement les valeurs T_1 et T_2.

21 **1. a.** ℓ représente la longueur de la tige et g l'intensité de la pesanteur du lieu.
b. ℓ en m, g en m · s^{-2} et T_0 en s.
2. a. L'intensité de la pesanteur est une grandeur qui dépend de l'altitude du lieu. La Paz, capitale la plus haute du monde, est une ville plus proche de l'équateur située à une altitude plus élevée $z_{LP} = 3\,660$ m.
b. Pour que $T_0 = 2{,}000$ s à La Paz ($g_{LP} = 9{,}792$ m · s^{-2}), il faut $\ell = 9{,}921 \times 10^{-1}$ m. Il faut donc remonter le disque métallique.
3. a. Les frottements de l'air fournissent un travail résistant sur le balancier et entraînent un amortissement des oscillations. Il s'agit donc de les réduire afin d'éviter un régime pseudo-périodique ou apériodique.
b. Sur une longue durée, les frottements liés à l'air et aux divers mécanismes de l'horloge, bien que faibles, ne sont non totalement négligeables : les oscillations du balancier sont ainsi faiblement amorties. Afin de conserver une amplitude suffisante, les oscillations sont entretenues par un transfert d'énergie potentielle de pesanteur issue du contrepoids.

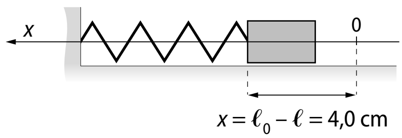
22 **1.** $T_0 = 2\pi\sqrt{\ell/g}$ pour un pendule simple et $T_0 = 2\pi\sqrt{m/k}$ pour un pendule élastique.
a. La période propre d'un pendule simple est donc indépendante de sa masse et ne sera pas modifiée. Celle d'un pendule élastique sera multipliée par $\sqrt{2}$. Les oscillations seront plus lentes.

b. Pour le pendule élastique, la période est indépendante de g. Pour le pendule simple, la période propre sera multipliée par $\sqrt{2}$.

2. a. La période propre des petites oscillations d'un pendule simple dépend de la valeur de l'intensité de la pesanteur, mais ne dépend pas de sa masse. Inversement, pour un pendule élastique, la période propre des oscillations dépend de sa masse, mais pas de l'intensité de la pesanteur.
b. Un pendule élastique.

3. a. $g = \ell \cdot (2\pi/T_0)^2 = 3{,}73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
b. $T_0 = 2\pi\sqrt{\ell/g} = 1{,}42$ s soit 32,4 oscillations à Paris.

23 **1.**



2. a. Sous forme d'énergie potentielle élastique.
b. $E_{pe} = 1/2 \cdot k \cdot x^2 = 1{,}6 \times 10^{-2}$ J à t = 0 s et $E_{pe} = 0$ J lors du passage par la position d'équilibre.

3. a. Il y a transfert d'énergie potentielle élastique en énergie cinétique.
b. À $t = 0$ s, $E_c = 0$ J. Lors du passage par la position d'équilibre, $E_c(\text{O}) = 1{,}6 \times 10^{-2}$ J.
c. $v_0 = \sqrt{2 \cdot E_c(\text{O})/m} = 6{,}3 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

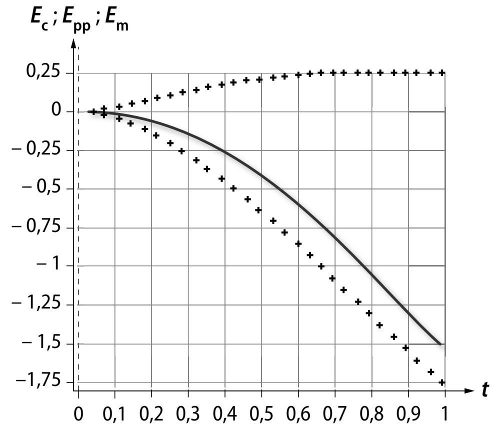
24 **1. a.** Initialement, le système possède de l'énergie cinétique. $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 = 0{,}5 \times 20 \times 10{,}0^2 = 1{,}0$ kJ.
b. Sous la forme d'énergie potentielle élastique.

2. a. L'énergie mécanique se conserve en l'absence de frottement.
b. $E_m = E_c + E_{pe} = 1/2 \cdot m \cdot v_G^2 + 1/2 \cdot k \cdot x_G^2$.
c. E_c : courbe mauve ; E_{pe} : courbe rose ; E_m : courbe bleue.

3. a. Lorsque E_{pe} est maximale, $x_G = x_{max}$ et $E_c = 0$ J.
$E_{pe} = 1/2 \cdot k \cdot x_{max}^2 = E_m = 1{,}0$ kJ donc $x_{max} = 0{,}37$ m.
$T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{m/k} = 0{,}23$ s.
b. 1 cm représente $5{,}5 \times 10^{-2}$ s horizontalement et 1 cm représente 455 J verticalement.

25 **1. a.** Phase 1 : mouvement rectiligne accéléré entre $t = 0$ s et $t = 0{,}7$ s.
Phase 2 : mouvement rectiligne uniforme à partir de $t = 0{,}7$ s.
b. Au cours de son mouvement, la bille est soumise à l'action de son poids et de frottements visqueux liés à son déplacement au sein du fluide.
L'action du poids reste supérieure à celle des forces de frottements tant que la vitesse reste inférieure $2{,}25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'application de la deuxième loi de Newton permet donc bien de conclure à un mouvement accéléré lors de la première phase.
Lorsque la vitesse limite est atteinte, les forces de frottement compensent le poids de la bille, le mouvement devient rectiligne uniforme (première loi de Newton).

2. a. L'énergie cinétique de la bille augmente dans la première phase puis reste constante dès le début de la seconde phase.
Les énergies potentielle de pesanteur et mécanique diminuent au cours des deux phases.
b. Courbe verte : énergie cinétique ; courbe bleue : énergie potentielle de pesanteur.
c. $E_m = E_c + E_{pp}$



3. a. Au cours de la première phase :
$$\Delta E_{c1} = 0{,}25 \text{ J et } \Delta E_{pp1} = -1{,}1 \text{ J}.$$
Au cours de la seconde phase :
$$\Delta E_{c2} = 0 \text{ J et } \Delta E_{pp2} = -1{,}75 + 1{,}1 = -0{,}65 \text{ J}.$$
b. $\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_{pp}$ soit $\Delta E_{m1} = -0{,}85$ J et $\Delta E_{m2} = -0{,}65$ J.
c. La bille est soumise à des frottements non négligeables car son énergie mécanique diminue.

4. a. $W_1(\vec{f}) = \Delta E_{m1} = -0{,}85$ J et $W_2(\vec{f}) = \Delta E_{m2} = -0{,}65$ J.
Il s'agit d'un travail résistant dans chaque cas.
b. $W_2(\vec{P}) = -\Delta E_{pp2} = 0{,}65$ J et $W_1(\vec{P}) = -\Delta E_{pp1} = 1{,}1$ J.
Le travail est moteur.

5. Au cours de la première phase, il y a transfert d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique et dissipation d'énergie (sous forme thermique). Au cours de la seconde phase, il y a dissipation d'énergie potentielle de pesanteur sous forme thermique.

26 **1.** Lors du mouvement, il y a transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle de pesanteur.

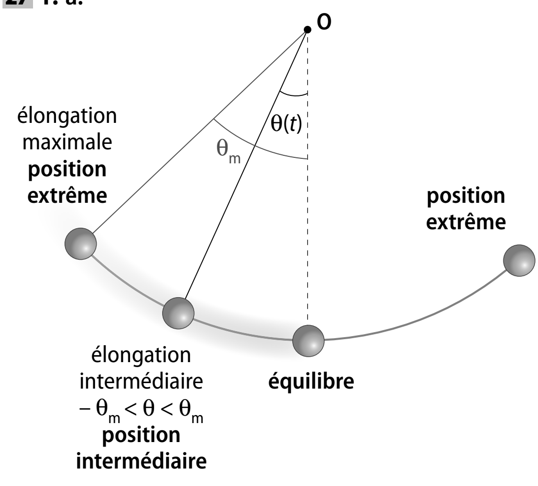
2. a. En A, à $t = 0$ s, $E_{m(A)} = 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot z_{(A)}$.
En choisissant l'origine des altitudes en A :
$$z_{(A)} = 0 \text{ m et } E_{m(A)} = 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 = 2{,}0 \times 10^{-1} \text{ J}.$$
b. Les frottements étant négligés, l'énergie mécanique de la balle se conserve au cours du mouvement.
En B, $E_{m(B)} = E_{m(A)} = 2{,}0 \times 10^{-1}$ J.

3. a. Soit C le point atteint par la balle lorsque son mouvement cesse : $v_c = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
Détermination de la distance AC parcourue.
$\Delta E_{mA \to C} = E_{m(C)} - E_{m(A)} = E_{c(C)} + E_{p(C)} - E_{c(A)} - E_{p(A)}$
$= E_{p(C)} - E_{c(A)} = 0.$
$1/2 \cdot m \cdot v_0^2 = m \cdot g \cdot z_{(C)}$ soit $z_{(C)} = v_0^2/2g = 4{,}6 \times 10^{-1}$ m.
$AC = z_{(C)}/\sin \alpha = 5{,}3$ m. La balle atteint le trou.
b. Détermination de la vitesse v_B de la balle.
$\Delta E_{mA \to B} = E_{c(B)} + E_{p(B)} - E_{c(A)} - E_{p(A)} = 0$
$E_{c(B)} = E_{c(A)} - E_{p(B)}$ soit $v_B^2 = v_0^2 - 2g \cdot AB \cdot \sin \alpha$
et $v_B = 6{,}7 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. Soit D le point atteint par la balle lorsque son mouvement cesse.
$W_{AB}(\vec{f}) = - f \cdot AD = 1/5 \cdot m \cdot g \cdot (z_{(A)} - z_{(D)})$
$= - 1/5 \cdot m \cdot g \cdot AD \cdot \sin \alpha.$

5. a. Détermination de la distance AD parcourue ($v_D = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).
$\Delta E_{mA \to D} = E_{m(D)} - E_{m(A)} = E_{p(D)} - E_{c(A)}$
$= - 1/5 \cdot m \cdot g \cdot AD \cdot \sin \alpha.$
$m \cdot g \cdot AD \cdot \sin \alpha - 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 = - 1/5 \cdot m \cdot g \cdot AD \cdot \sin \alpha$, soit $6/5 \cdot AD \cdot \sin \alpha = v_0^2/2g$ et $AD = 5\, v_0^2/(12 \cdot g \cdot \sin \alpha) = 4{,}4$ m.
La balle n'atteint pas le trou.
b. À 60 cm.

27 **1. a.**



b. En position d'équilibre, le pendule dispose d'une énergie cinétique maximale et d'une énergie potentielle de pesanteur minimale. Dans une position extrême, son énergie cinétique est nulle alors que son énergie potentielle de pesanteur est maximale.

2. a. Dans le cas d'un chronométrage $\Delta t = T_0 = 1{,}04$ s au centième sur une seule oscillation, l'incertitude sur la mesure vaut $\Delta T_0 = 0{,}10$ s.
$T_0 = 1{,}04 \text{ s} \pm 0{,}10$ s, soit une précision de 9,6 %.
Dans le cas d'un chronométrage $\Delta t = 10T_0 = 10{,}42$ s au centième sur dix oscillations, l'incertitude sur la mesure vaut $\Delta T_0 = 0{,}10$ s.
$10T_0 = 10{,}42 \text{ s} \pm 0{,}10$ s, soit $T_0 = 1{,}042 \text{ s} \pm 0{,}010$ s une précision de 0,96 %.
Le fait de mesurer la durée de plusieurs oscillations améliore la précision de la mesure.
b. Il ne faut pas prendre un nombre trop grand d'oscillations. En effet, l'amplitude des oscillations diminue au cours du temps à cause de l'amortissement dû aux frottements. Lorsqu'elle devient faible, le repérage des oscillations et la mesure des périodes deviennent plus imprécises.

3. a. La valeur moyenne, soit $T_0 = 12{,}54/10 = 1{,}254$ s pour la première série et $T_0 = 12{,}45/10 = 1{,}245$ s pour la seconde.
b. Première série : $\sigma = 6{,}22 \times 10^{-3}$ s ;
seconde série : $\sigma = 8{,}71 \times 10^{-3}$ s.
c. $\Delta T_0 = 2\sigma$ et $T_0 = T_0 \pm \Delta T_0$ donc pour la première série : $\Delta T_0 = 1{,}24 \times 10^{-2}$ s et pour la seconde :
$\Delta T_0 = 1{,}74 \times 10^{-2}$ s.
La précision de la première méthode est de 0,992 %, de la seconde 1,40 %.

4. Il est préférable de :
– déclencher le chronomètre après une ou deux oscillations (il est difficile de le faire au moment du lâcher du pendule) ;
– déclencher le chronomètre à l'instant où le pendule passe par une position extrême (plus facilement repérable car la vitesse du pendule s'annule) ;
– raisonner sur plusieurs oscillations.

SÉQUENCE 6

PARTIE 2

➙ Enseignement spécifique, p. 214

Temps et relativité restreinte

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Définition du temps atomique. – Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps. – Postulat d'Einstein. Tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière.	– Extraire et exploiter des informations relatives à la mesure du temps pour justifier l'évolution de la définition de la seconde. – Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps et la définition de la seconde. – Extraire et exploiter des informations pour justifier l'utilisation des horloges atomiques dans la mesure du temps. – Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.
– Notion d'événement. Temps propre. – Dilatation des durées. – Preuves expérimentales.	– Définir la notion de temps propre. – Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée. – Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.

Les compétences à acquérir dans la séquence
1. S'informer sur la problématique de la mesure du temps.
2. Prendre en compte l'invariance de la vitesse de la lumière et la relativité du temps.
3. Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.

Évaluation diagnostique *p. 214*

SITUATION 1

Cette situation a pour objet d'amorcer la réflexion sur ce qui peut faire la qualité d'une horloge (ou d'une montre). De façon générale, les qualités d'une horloge sont, comme tout instrument de mesure, la stabilité (la fiabilité) – la mesure du temps est reproductible, régulière et ne dérive pas – et la précision – la mesure du temps est basée sur un étalon le plus petit possible. Ces qualités sont évoquées plus en détail dans **l'activité 1**.

SITUATION 2

Cette situation a pour objet de revenir sur la loi de la relativité de mouvement vue en classe de Seconde et de mettre en évidence la limite de cette loi dans le cas de la lumière par exemple.

Pour le pilote du vaisseau, la vitesse des tirs lasers peut-elle être nulle comme pourrait le prétendre la loi de la relativité du mouvement ? Peut-on imaginer que la lumière ait une vitesse nulle dans un référentiel ?

L'**activité 2** permettra de montrer que la vitesse de la lumière est un invariant (postulat d'Einstein).

SITUATION 3

Cette situation a pour objet de vérifier que le théorème de Pythagore est maîtrisé par les élèves et qu'ils peuvent l'utiliser dans une situation contextualisée où l'on cherche à déterminer une distance inconnue.

En mesurant les distances d_1 et d_2 à l'aide d'un télémètre (dont le principe repose sur la mesure du temps d'un aller-retour de la lumière entre deux points), il est possible d'en déduire la hauteur H en utilisant le théorème de Pythagore.

D'après le théorème de Pythagore, $d_1^2 = d_2^2 + H^2$ donc :

$$H = (d_1^2 - d_2^2)^{1/2}.$$

Ce rappel sera utile pour la mise en œuvre de l'**activité 4**, où l'on fera modéliser la dilation du temps par les élèves.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

La mesure du temps *p. 216*

1. a. Une horloge mécanique se base sur un phénomène périodique mécanique comme le mouvement oscillant d'un balancier.
b. Les inconvénients d'une telle horloge sont qu'elle :
– est peu précise ;
– nécessite d'être remontée régulièrement.

2. a. Une montre à quartz se base sur la fréquence de vibration du quartz qui a la particularité de vibrer quand il est parcouru par un courant électrique.
b. La fréquence du quartz est très stable et permet une bonne précision dans la mesure du temps.

3. a. Une horloge atomique se base sur la fréquence du rayonnement qui accompagne la transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome (comme par exemple le césium).
b. Une telle horloge est plus stable et plus précise que n'importe quelle autre horloge.
c. La fréquence du quartz est $f_q = 32\,768$ Hz.

4. L'ancienne définition de la seconde la définit comme la 1/86 400e partie du jour solaire moyen. En effet, un jour solaire compte 24 h, soit $24 \times 3\,600 = 86\,400$ s.
La définition la plus récente de la seconde la définit comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition de deux niveaux d'énergie de l'atome de césium. En effet, la fréquence correspondante est de 9 192 631 770 Hz.

5. Les qualités d'une horloge sont la stabilité et la précision.

6. L'évolution de la définition de la seconde a évolué avec l'évolution scientifique et technologique : la définition précédente était basée sur un phénomène périodique astronomique et la définition actuelle se base sur la durée d'une période d'un rayonnement émis ou absorbé au niveau d'un atome.

ACTIVITÉ 2

La vitesse de la lumière en question *p. 217*

1. a. Au départ, le but de l'expérience de Michelson et Morley a été d'appliquer la relativité de mouvement à la lumière.
b. Le dispositif permet de comparer la durée d'un trajet identique effectué par deux faisceaux lumineux : l'un correspond à une lumière se propageant dans la direction du mouvement de la Terre et l'autre à une lumière se propageant dans une direction perpendiculaire.

2. a. L'intérêt d'un miroir semi-argenté est qu'il permet à un faisceau incident d'être en partie réfléchi et en partie transmis.
b. Dans le dispositif, le miroir semi-argenté doit être incliné de 45° pour que les faisceaux réfléchi et transmis soient perpendiculaires.

3. a. Le phénomène optique utilisé ici est le phénomène d'interférence.
b. Les paramètres identifiés par Michelson et Morley qui peuvent avoir une conséquence sur le phénomène étudié sont :
– le retard de propagation ;
– la distance parcourue.

4. a. La vitesse de la lumière est un invariant.
b. Ce résultat est en contradiction avec la physique classique connue jusque-là où le mouvement est relatif, autrement dit où la vitesse d'un système d'étude dépend du référentiel.

ACTIVITÉ 3

La relativité du temps *p. 218*

1. a. Au moment du tir laser, la Terre se situe devant la navette spatiale.
Au moment de la détection du signal réfléchi, la Terre se situe derrière la navette spatiale.
b. Dans la figure 2ⓐ, le référentiel est la Terre.
c. Dans la figure 2ⓑ, le référentiel est la navette spatiale.

2. D'après le postulat d'Einstein, la vitesse de la lumière ne dépend ni du mouvement de la source ni de celui de l'observateur, donc ne dépend pas du référentiel.

3. a. La lumière laser va parcourir une distance plus importante dans le référentiel de la navette spatiale.
b. La durée de propagation de la lumière laser est donc plus importante quand le référentiel est la navette spatiale.

4. La vitesse de la lumière est un invariant, donc elle est la même pour un observateur stationnaire et pour un observateur en mouvement.

5. a. La durée séparant deux événements qui se produisent au même endroit n'est pas la même pour un observateur stationnaire et pour un observateur en mouvement.
b. La durée se dilate dans un référentiel en mouvement.

ACTIVITÉ 4

Modéliser la dilatation du temps *p. 219*

1. Dans le cas de l'observateur terrestre :
a. Pour faire un aller-retour Terre-Lune, la distance parcourue par la lumière laser est de $2d$.
b. On en déduit la durée propre Δt_p mise par le rayon laser pour faire l'aller-retour Terre-Lune :

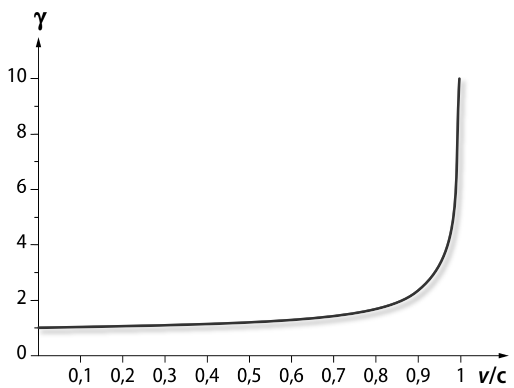
$$c = 2d/\Delta t_p \text{ donc } \Delta t_p = 2d/c.$$

2. Dans le cas de l'observateur embarqué dans la navette spatiale qui se déplace à une vitesse v :
a. La distance parcourue par la lumière laser pour faire l'aller-retour Terre-Lune est de $2D$.
On en déduit la durée mesurée Δt_m mise par le rayon laser pour faire l'aller-retour Terre-Lune :
$$c = 2D/\Delta t_m \text{ donc } \Delta t_m = 2D/c.$$
b. Δt_m est la durée que met le vaisseau spatial pour parcourir la distance L à la vitesse v.
$v = L/\Delta t_m$ donc $\Delta t_m = L/v$.

3. a. En utilisant le théorème de Pythagore, on peut écrire :
$$D^2 = d^2 + (L/2)^2.$$
b. $D = \Delta t_m \cdot c/2$.
$d = \Delta t_p \cdot c/2$.
$L = \Delta t_m \cdot v$.
Donc $(\Delta t_m \cdot c/2)^2 = (\Delta t_p \cdot c/2)^2 + (\Delta t_m \cdot v/2)^2$
$(\Delta t_m \cdot c)^2 = (\Delta t_p \cdot c)^2 + (\Delta t_m \cdot v)^2$
$\Delta t_m^2 \cdot (c^2 - v^2) = (\Delta t_p \cdot c)^2$
$\Delta t_m^2 \cdot (1 - (v/c)^2) = \Delta t_p^2$

4. a. $\Delta t_m^2 \cdot (1 - (v/c)^2) = \Delta t_p^2$
donc $\Delta t_m = (1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}) \cdot \Delta t_p$
donc $\Delta t_m = \gamma\, \Delta t_p$
avec γ facteur de Lorentz $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$.
b. En admettant que la vitesse de lumière dans le vide est une vitesse limite, $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} \geqslant 1$.
Donc $\Delta t_m \geqslant \Delta t_p$, ce qui met en évidence la dilatation des durées pour un observateur en mouvement.

5. a. À l'aide d'un tableur-grapheur ou d'une calculatrice, on peut représenter l'évolution du facteur de Lorentz γ en fonction de (v/c) :



b. D'après la représentation graphique précédente :
– quand v atteint une vitesse de l'ordre du 1/20^e de celle de la lumière, $(v/c) = 0{,}2$, $\gamma > 1$, donc la dilatation du temps est notable ;
– quand v se rapproche de la vitesse de la lumière c, (v/c) tend vers 1, γ tend vers l'infini, donc la dilation du temps est colossale.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *S'informer sur la problématique de la mesure du temps*

1 **1.** **b** et **c.**

2. b.

3. a.

2 **1.** *Vrai*.

2. *Faux*. Les systèmes mécaniques oscillants construits par l'Homme subissent des phénomènes dissipatifs et ne permettent donc pas une mesure régulière du temps.

3. *Faux*. Le quartz vibre à une fréquence connue dès lors qu'il est traversé par un courant.

4. *Vrai*.

3 **1.** Un phénomène physique peut servir d'horloge à condition qu'il se répète exactement « autant de fois qu'on le désire », autrement dit qu'il s'agit d'un phénomène périodique.

2. L'unité de temps correspondante est alors définie comme l'intervalle entre le commencement et la fin d'une période du phénomène.

3. Une horloge sert à mesurer des intervalles de temps.

4 **1.** La propriété d'un pendule utilisée dans une horloge mécanique à poids est l'isochronisme : la durée d'une oscillation ne dépend que sa longueur.

2. Le rôle du « poids » est d'entretenir les oscillations.

3. La limite d'un tel système est que le « poids » doit être remonté régulièrement pour pouvoir continuer à entretenir le mécanisme.

5 **1.** La définition de la seconde se base sur l'horloge atomique au césium.

2. Le nombre de périodes donné dans cette définition correspond à la fréquence (nombre de périodes par seconde) du rayonnement qui accompagne la transition entre deux niveaux d'énergie parfaitement connue de l'atome de césium.

3. Cette définition de la seconde est précise, car le nombre de périodes d'oscillations qui permet de définir une seconde est très important. Elle est stable car la fréquence du rayonnement est constante.

6 **1.** L'étalon de temps utilisé pour établir le temps universel (UT) est la durée d'une journée.

2. Le temps atomique international (TAI) est établi en faisant la moyenne des informations provenant de plusieurs centaines d'horloges atomiques réparties en différents endroits du globe.

3. Il est pertinent de tenir compte de ces deux types de temps pour assurer une précision dans la mesure du temps et pour maintenir une cohérence avec l'alternance des jours et des nuits.

COMPÉTENCE 2 : *Prendre en compte l'invariance de la vitesse de la lumière et la relativité du temps*

7 **1. b.**

2. a et **c.**

3. b.

8 **1.** *Faux*. Elle ne dépend pas du mouvement de l'observateur.

2. *Faux*. Il a un caractère relatif.

3. *Vrai*.

4. *Faux*. La dilatation du temps pour un système en mouvement peut se démontrer expérimentalement à l'aide d'horloges très précises et pour une vitesse très importante.

9 ***Le prix Nobel de physique 1907***
Michelson inventa son interféromètre pour mettre en évidence l'effet du mouvement de la Terre sur la vitesse de la lumière. En collaboration avec Morley, et en utilisant l'interféromètre, il montra que la lumière avait une vitesse constante dans tout référentiel. Cette expérience sur la vitesse de la lumière est l'une des expériences historiques les plus remarquables de physique et a permis le développement de la théorie de la relativité d'Einstein.
Michelson a reçu le Prix Nobel en 1907 pour son travail.

1. *Quelle est la particularité de la vitesse de la lumière ?*
La vitesse de la lumière est constante dans tout référentiel.

2. *Pourquoi l'expérience de Michelson-Morley était-elle importante pour la physique ?*
Elle permit à Einstein de développer sa théorie de la relativité.

10 **1. a.** Le résultat de l'expérience de Michelson et Morley met en évidence que la lumière se propage, dans tout référentiel, toujours à la même vitesse c.
b. Ce résultat est en contradiction avec la mécanique rationnelle galiléenne, car elle remet en cause le caractère relatif du mouvement.

2. a. « Deux événements spatialement séparés » sont deux événements qui se produisent en deux lieux différents.
b. Deux événements en apparence simultanés ne le sont pas forcément en raison de la dilatation du temps pour un observateur en mouvement.
c. La conséquence importante pour le temps est qu'il n'est pas absolu.

11 **1.** On parle de « paradoxe » des jumeaux car deux jumeaux doivent avoir constamment le même âge, ce qui n'est pas le cas ici.

2. La dilation du temps est la conséquence de la théorie d'Einstein qui est validée par l'expérience réalisée dans les accélérateurs de particules.

3. La dilatation du temps dépend de la vitesse de l'objet en mouvement.

COMPÉTENCE 3 : *Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée*

12 **1. a.**

2. a et **c.**

3. a, **b** et **c.**

13 **1.** *Faux*. Si la vitesse de déplacement est celle de la lumière, la durée mesurée est infinie.

2. *Faux*. La durée propre entre deux événements est déterminée par une horloge placée au lieu où se déroulent ces événements.
c. *Vrai*.

14 **1.** Pour la personne présente sur le quai, la durée de la mesure au télémètre est plus longue car le trajet effectué par la lumière est plus important.

2. La durée de la mesure est :
– la « durée propre » pour la personne présente dans le train ;
– la « durée mesurée » pour la personne présente sur le quai.

3. La relation entre ces deux durées dépend de la vitesse de déplacement du train.

16 **1.** Pour un observateur resté sur Terre, la durée du voyage serait de $\Delta t_m = 0{,}80 \times 4{,}2 = 3{,}4$ années.

2. a. $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p$
$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0{,}80^2)^{1/2} = 1{,}7$,
donc $\Delta t_p = \Delta t_m/\gamma = 3{,}4/1{,}67 = 2$ années.
b. Pour diviser par 2 la durée du voyage pour les passagers, il faudrait que $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 2$
donc que $(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 0{,}5$
donc que $1 - (v/c)^2 = 0{,}25$
donc que $(v/c)^2 = 0{,}75$
soit $v = 0{,}87$ c.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

17 **1.** $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$
$= 1/(1 - (260/(3{,}00 \times 10^8))^2)^{1/2} = 1{,}00$.

2. Le décalage peut être considéré comme nul.

18 Une horloge atomique au césium permet une précision à la nanoseconde, c'est-à-dire à 10^{-9} s.

Pour déterminer à partir de quelle vitesse de déplacement la dilation du temps peut être mesurable avec une telle horloge atomique, on cherche la valeur de v telle que $1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1{,}000\,000\,001$.
$v = 4{,}47 \times 10^{-5} \times c$.

19 La précision de la mesure du temps
Le graphe présente l'évolution de la précision de la mesure du temps au cours des derniers siècles.

1. a. *Quelle était l'incertitude de mesure pour un oscillateur mécanique comme le pendule d'Huygens ?*
L'incertitude de mesure pour un oscillateur comme le pendule d'Huygens est, d'après le graphe, de 10 secondes sur une journée.
b. *Comment expliquer cette incertitude importante dans la mesure du temps ?*
Ce sont les effets dissipatifs qui expliquent cette incertitude importante dans la mesure du temps.

2. a. *Combien de fois les horloges atomiques commercialisées sont-elles plus précises que les oscillateurs à quartz ?*
Les horloges atomiques commercialisées sont 10 000 fois plus précises que les oscillateurs à quartz puisqu'on passe d'une incertitude de 10^{-4} s à 10^{-8} s par jour.
b. *Où sont utilisées ces horloges ultra-précises ?*
Ces horloges ultra-précises sont utilisées dans les systèmes GPS par exemple.

3. *Au bout de combien d'années les horloges les plus récentes présentent-elles une erreur d'une seconde ?*
Les horloges les plus récentes présentent une incertitude de 10^{-12} s par jour donc de :
$$10^{-12} \times 365 = 3{,}65 \times 10^{-12} \text{ s par an.}$$
Elles présenteront une erreur d'une seconde au bout de :
$$1/(3{,}65 \times 10^{-12}) = 2{,}74 \times 10^{11} \text{ années.}$$

20 **1. a.** γ tend vers l'infini.
b. Cela signifie que l'horloge associée à l'objet en mouvement a une vitesse considérablement ralentie.

2. a. Pour dilater le temps par 2 au niveau de l'horloge associée à l'objet en mouvement, le coefficient de Lorentz doit être égal à 2.
b. Par lecture graphique, $v/c = 0{,}9$, donc $v = 0{,}9c$.

21 **1.** La vitesse de la lumière dans le vide est $c = 3{,}00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans tout référentiel (postulat d'Einstein sur l'invariance de la vitesse de lumière).

2. Le tir laser est émis toutes les 0,5 s. Donc la durée entre deux tirs est de 0,5 s.

3. On détermine le coefficient de Lorentz pour évaluer l'impact de la dilatation du temps :
$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}.$$
A.N. : $\gamma = 1/(1 - (0{,}5c/c)^2)^{1/2}$, soit $\gamma = 1{,}15$.
Pour l'observateur extérieur, les durées se dilatent et la durée entre deux tirs est de 0,6 s.

22 **1. a.** Pour une personne restée sur Terre, le voyage Terre-Bételgeuse dure 300 années (puisque la distance parcourue est de 300 années de lumière de la Terre et le vaisseau se déplace à une vitesse voisine de celle de la lumière).
b. La différence importante avec la durée perçue par les voyageurs du vaisseau s'explique par le phénomène de dilatation du temps qui est d'autant plus important que la vitesse de déplacement est proche de celle de la lumière.

2. $\Delta t_m = 300$ années.
$\Delta t_p = 2$ années.
Donc $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 150$.
On en déduit que $v \approx c$.
On retrouve bien la vitesse donnée par l'auteur du roman.

23 **1. a.** L'intérêt d'utiliser des horloges atomiques est de mesurer des temps et des durées avec une grande précision.
b. Deux horloges se synchronisent quand elles indiquent le même temps à un instant donné.

2. a. Par rapport à la Terre, les distances parcourues par les fusées à la date τ valent respectivement $\Delta d_1 = v_1 \cdot \tau$ et $\Delta d_2 = v_2 \cdot (\tau - T)$.
b. À l'instant de la rencontre, $\Delta d_1 = \Delta d_2$; on en déduit :
$$\tau = v_2 \cdot T/(v_2 - v_1).$$

3. a. Pour la fusée 1, le décollage de la fusée 2 a lieu à l'instant $T_1 = \gamma_1 \cdot T$ avec $\gamma_1 = 1/(1 - (v_1/c)^2)^{1/2.}$
b. Pour la fusée 1, la rencontre avec la fusée 2 a lieu à l'instant $\tau_1 = \tau/\gamma_1$ avec $\gamma_1 = 1/(1 - (v_1/c)^2)^{1/2}$, car dans ce cas, τ_1 est la durée propre qui est mesurée lors de la rencontre des deux fusées par la fusée 1.

24 **1.** Dans le cas où l'objet en mouvement est un avion à réaction :
$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$$
$$= 1 / (1 - (10^6/(3\,600 \times 3{,}00 \times 10^8))^2)^{1/2}$$
$$= 1{,}000\,000\,000\,000\,4.$$

2. La dilatation du temps est notable dans les conditions de l'expérience pour des horloges précises à 10^{-13} seconde, donc les horloges atomiques ont pu effectivement la déceler.

25 **1. a.** L'intervalle de temps qui correspond en relativité à la durée propre Δt_p est la durée qui sépare l'envoi de signaux lumineux par la fusée, autrement dit $\Delta t_p = 1$ s.
b. L'intervalle de temps qui correspond en relativité à la durée mesurée Δt_m est l'intervalle qui sépare deux signaux lumineux vus de la Terre.

2. a. Comme la fusée se déplace de façon rectiligne à une vitesse constante, la relation entre durée mesurée et durée propre est applicable.

b. Pour déterminer l'intervalle de temps avec lequel sont perçus les signaux qui sont détectés sur Terre, on détermine le coefficient de Lorentz :

$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$
$= 1/(1 - (250\,000\,000/3{,}00 \times 10^8)^2)^{1/2} = 1{,}81.$

Donc $\Delta t_m = 1{,}81$ s.

26 **1.** En raisonnant en physique classique, on peut montrer que la distance parcourue par les muons ne devrait être que de quelques centaines de mètre :
$d = v \cdot \Delta t_p = 0{,}999\,7 \times 3{,}00 \times 10^8 \times 2{,}2 \times 10^{-6} = 660$ m.

2. En raisonnant en physique relativiste :

a. on détermine le coefficient de Lorentz :
$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0{,}999\,7^2)^{1/2} = 40{,}83.$

b. $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p = 40{,}83 \times 2{,}2 \times 10^{-6} = 90$ µs.

c. Avec une telle durée de vie, les muons atteignent effectivement le sol :
$d' = v \cdot \Delta t_m = 0{,}999\,7 \times 3{,}00 \times 10^8 \times 90 \times 10^{-6} = 27$ km.

27 **1.** La géolocalisation par GPS exige une mesure précise des durées Δt de propagation des ondes électromagnétiques entre les satellites associés et le GPS, car cela permet une précision des mesures de distances qui en découlent et qui permettent la localisation par triangulation.

2. On peut montrer que dans le cas de la géolocalisation GPS, il faut prendre en compte les effets de la dilatation du temps prévus par la théorie de la relativité d'Einstein. En effet, dans ce cas, γ est légèrement différent de 1 et cet écart est décelable par les horloges atomiques :

$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - (3\,874/(3{,}00 \times 10^8))^2)^{1/2}$
$= 1{,}000\,000\,000\,083\,4.$

3. On peut déterminer l'écart de temps qu'il peut exister entre une horloge présente dans le GPS et une horloge d'un satellite au bout d'un jour mesuré sur Terre :

$1 \text{ j} = 3\,600 \times 24 = 86\,400$ s.

Donc sur un jour, l'écart est de :
$0{,}000\,000\,000\,083\,4 \times 86\,400 = 0{,}000\,007\,20 \text{ s} = 7{,}20$ µs.

28 **1.** Dans le référentiel d'un méson, la distance moyenne parcourue par la particule avant désintégration est de :
$d = v \cdot \Delta t_p = 0{,}999\,999 \times 3{,}00 \times 10^8 \times 2{,}6 \times 10^{-8} = 7{,}8$ m.

2. $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0{,}999\,999^2)^{1/2} = 707{,}107.$
Donc la durée mesurée de la vie moyenne d'un méson est :

$\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p = 707{,}107 \times 2{,}6 \times 10^{-8} = 1{,}8 \times 10^{-5}.$

Dans le référentiel du laboratoire, la distance moyenne parcourue par la particule avant désintégration est de :

$d' = v \cdot \Delta t_m = 0{,}999\,999 \times 3{,}00 \times 10^8 \times 1{,}8 \times 10^{-5}$
$= 5\,400 \text{ m} = 5{,}4$ km.

29 On cherche à déterminer la durée écoulée entre le départ du vaisseau de la Terre et le moment où le missile explose.

1. Pour le missile :
$\Delta t = (\Delta t \text{ trajet})_{\text{propre}} + (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{propre}} = 30{,}0 + 5{,}50$
$= 35$ min 30 s.

2. Pour le pilote présent dans le vaisseau spatial :
$\Delta t = (\Delta t \text{ trajet})_{\text{propre}} + (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{mesuré}}$
$= (\Delta t \text{ trajet})_{\text{propre}} + \gamma \text{ détonateur/vaisseau} \cdot (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{propre}}$

$\gamma \text{ détonateur/vaisseau} = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0{,}60^2)^{1/2}$
$= 1{,}25.$

$\Delta t' = 30{,}0 + 1{,}25 \times 5{,}50 = 36$ min 50 s.

3. Pour le centre spatial terrestre :
$\Delta t = (\Delta t \text{ trajet})_{\text{mesuré}} + (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{mesuré}}$
$= \gamma \text{ trajet/Terre} \times (\Delta t \text{ trajet})_{\text{propre}} + \gamma \text{ détonateur/Terre} \times (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{propre}}$

$\gamma \text{ trajet/Terre} = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0{,}20^2)^{1/2} = 1{,}7$
$\gamma \text{ détonateur/Terre} = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0{,}80^2)^{1/2}$
$= 1{,}02$

$\Delta t'' = 30{,}0 \times 1{,}02 + 5{,}50 \times 1{,}7 = 30{,}6 + 9{,}35 = 40$ min.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

30 **1. a.** Le « coefficient de dilation du temps » correspond au coefficient de Lorentz.

b. Le coefficient de contraction des longueurs est l'inverse du coefficient de dilatation du temps :

$$\Delta = 1/\gamma = (1 - (v/c)^2)^{1/2}.$$

c. $L_m = \delta \cdot L_p$.

2. On cherche la « très grande vitesse » évoquée dans le texte qui permettrait à une échelle de 25 mètres de rentrer dans une grange de 20 mètres :

$L_p = 25$ m
$L_m = 20$ m
donc $\delta = 0{,}80$
donc $(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 0{,}80$
soit $v = 0{,}60 \times c = 1{,}80 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. La perception du fermier et celle de la fourmi sont différentes, car la fourmi présente sur l'échelle perçoit la longueur propre de l'échelle tandis que le fermier perçoit la longueur mesurée.

Cinétique chimique

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Réactions lentes, rapides ; durée d'une réaction chimique. – Facteurs cinétiques. – Évolution d'une quantité de matière au cours du temps. – Temps de demi-réaction.	– *Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour suivre dans le temps une synthèse organique par CCM et en estimer la durée.* – *Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mettre en évidence quelques paramètres influençant l'évolution temporelle d'une réaction chimique : concentration, température, solvant.* – Déterminer un temps de demi-réaction.
– Catalyse homogène, hétérogène et enzymatique.	– *Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mettre en évidence le rôle d'un catalyseur.* – Extraire et exploiter des informations sur la catalyse, notamment en milieu biologique et dans le domaine industriel, pour en dégager l'intérêt.

Les compétences à acquérir dans la séquence
1. Suivre l'évolution dans le temps d'une réaction chimique.
2. Connaître quelques paramètres influençant l'évolution temporelle d'une réaction chimique.
3. Mettre en évidence le rôle d'un catalyseur.

Évaluation diagnostique *p. 232*

SITUATION 1
Il est des technologies que nous utilisons au quotidien qui empruntent à la catalyse : four du même nom, pot catalytique. De la même façon, nombre d'espèces qui fondent les produits manufacturés sont produites par des réactions catalysées : elles ont été déclenchées ou accélérées par une espèce chimique introduite dans le milieu à cet effet : un catalyseur.
C'est sur ces questions que les **activités 1** et **2** proposent des éclairages.

SITUATION 2
La pression des gaz, air et vapeur d'eau, présents dans l'enceinte d'un autocuiseur est supérieure à la pression atmosphérique. De fait, la température d'ébullition de l'eau est supérieure à 100 °C. Les aliments y cuisent donc plus rapidement. Y a-t-il d'autres paramètres qui influencent la durée d'une réaction chimique ?… C'est la réflexion que propose de conduire l'**activité 3**.

SITUATION 3
La chromatographie, abordée en classes de 2de et de 1re, est une technique qui permet de séparer et d'identifier par comparaison les espèces chimiques constitutives d'un mélange généralement homogène. Elle permet donc de s'assurer de la formation ou de la disparition d'une espèce chimique d'un milieu à une date donnée et par là même, comme le présente l'**activité 4**, de suivre l'évolution au cours du temps d'une réaction chimique.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1
Autour de la catalyse *p. 234*

1. Un catalyseur est une espèce chimique qui est susceptible d'accélérer une réaction cinétiquement inerte, ou de modifier la durée d'évolution d'un système chimique, mais qui n'est pas elle même consommée lors de cette réaction. La catalyse permet encore d'orienter l'évolution d'un système vers une réaction, lorsqu'il est susceptible d'être le siège de réactions concurrentes.

2. Une enzyme est un biocatalyseur, c'est-à-dire un catalyseur d'origine biologique.

3. Lors d'une synthèse industrielle ou au laboratoire, la catalyse permet généralement d'accélérer les processus et d'améliorer la sélectivité des réactions.

4. La synthèse de l'ammoniac, tout comme le traitement et la valorisation des pétroles, utilisent la catalyse hétérogène.

5. La catalyse homogène peut être définie comme un processus dans lequel le catalyseur et le milieu réactionnel sont dans le même état physique.

6. Dans ce cas, le catalyseur utilisé « *modifie les données du jeu et donc oriente vers un résultat plutôt qu'un autre* » : c'est donc la sélectivité du catalyseur qui est mise en évidence.

7.

Procédés ou synthèses	Type de catalyse	Catalyseur
Craquage	Hétérogène	Zéolithes
Reformage	Hétérogène	Pt-Al_2O_3
Synthèse de l'ammoniac	Hétérogène	Fer associé à de faibles quantités d'oxydes métalliques ou ruthénium sur support de graphite
Dimérisation des oléfines	Homogène	Selon la sélectivité souhaitée : trialkyl aluminium ou complexe du nickel
Synthèse du styrène	Hétérogène	Fe_2O_3

8. On peut légitimement penser que l'industrie chimique poursuit deux objectifs : produire au moindre coût tout en préservant la santé des opérateurs et des utilisateurs ainsi que l'environnement. En cela, « *la catalyse nous permet de trouver des solutions pour élaborer plus efficacement les molécules que nous utilisons, en économisant les matières premières, l'énergie et réduisant de fait notre impact sur l'environnement* ». Ainsi, la chimie verte, concept développé dans la *Partie 5, séquence 2*, emprunte beaucoup à la catalyse.

ACTIVITÉ 2

Les enzymes : des biocatalyseurs ? *p. 235*

1. L'amidon est obtenu par polycondensation de molécules de glucose.

2. $2\,(C_6H_{10}O_5)_n + n\,H_2O \rightarrow n\,C_{12}H_{22}O_{11}$

3. Le glucose et le maltose (les sucres réducteurs) sont mis en évidence par le précipité rouge d'oxyde de cuivre qu'ils forment en réagissant à chaud avec de la liqueur de Fehling. L'amidon est quant à lui mis en évidence par de l'eau iodée : en sa présence, elle prend une coloration violette ou noire selon sa concentration dans le milieu.

5. Voir expérience.

6. Ces réactions sont réalisées à 37 °C, température du corps humain, afin de modéliser au mieux, la réalité des réactions catalytiques étudiées.

7. La réaction entre l'amidon et l'eau est cinétiquement inerte, même à 37 °C.

8. Le test positif à la liqueur de Fehling montre que l'acide chlorhydrique est un catalyseur de réaction. En sa présence, l'hydrolyse de l'amidon a eu lieu : on parle d'hydrolyse acide.

9. La solution d'amylase catalyse l'hydrolyse de l'amidon comme l'attestent les résultats expérimentaux qui révèlent la présence de maltose : il s'agit d'une catalyse enzymatique. En sa présence, l'hydrolyse de l'amidon est notablement accélérée, beaucoup plus qu'elle ne l'est lors d'une catalyse acide comme le montrent les résultats comparés des tubes 2 et 3 à la date $t = 2$ min.

10. Une enzyme est un catalyseur biochimique dans la mesure où elle est généralement une protéine issue du monde du vivant.

11. Dans la mesure où la salive permet l'hydrolyse de l'amidon elle contient nécessairement de l'amylase.

ACTIVITÉ 3

Facteurs cinétiques *p. 236*

1. C'est la formation du soufre colloïdal, puis du précipité de soufre qui permet de suivre l'évolution au cours du temps du système chimique considéré.

2. Dans la mesure où l'on apprécie à l'œil nu la disparition comparée d'un motif à travers une colonne de liquide, il convient de maintenir cette colonne de liquide identique d'une expérience à une autre : soit conserver des béchers de même section et y introduire le même volume de liquide.

3. On a :

$$[H_3O^+]_{initial} = \frac{c_2 \cdot V_2}{(V_1 + V_2 + V_{eau})}$$

$$\text{et } [S_2O_3^{2-}]_{initial} = \frac{c_1 \cdot V_1}{(V_1 + V_2 + V_{eau})}.$$

V_1 (mL)	V_2 (mL)	V_{eau} (mL)	$[H_3O^+]_{initial}$	$[S_2O_3^{2-}]_{initial}$	Δt (s)
40	10	0	0,20 mol · L^{-1}	$8{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}	
20	10	20	0,20 mol · L	$4{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}	
10	10	30	0,20 mol · L	$2{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}	

4. Les demi-équations d'oxydoréduction associées à chacun des couples redox sont :

$2\,CO_2(aq) + 2\,H^+(aq) + 2\,e^- \rightleftharpoons H_2C_2O_4\,(aq)$

$MnO_4^-\,(aq) + 8\,H^+\,(aq) + 5\,e^- \rightleftharpoons Mn^{2+}\,(aq) + 4\,H_2O\,(l)$

On peut donc écrire :

$$2\,MnO_4^-\,(aq) + 5\,H_2C_2O_4\,(aq) + 6\,H^+\,(aq) \rightarrow 2\,Mn^{2+}\,(aq) + 8\,H_2O\,(l) + 10\,CO_2\,(aq)$$

5. Le milieu réactionnel, violet du fait de la présence de l'ion permanganate en solution, se décolore progressivement.

6. Les demi-équations d'oxydoréduction associées à chacun des couples redox sont :
$O_2(aq) + 2\,H^+(aq) + 2\,e^- \rightleftharpoons H_2O_2\,(aq)$
$H_2O_2\,(aq) + 2\,H^+(aq) + 2\,e^- \rightleftharpoons 2\,H_2O\,(l)$
On peut donc écrire :

$$2\,H_2O_2\,(aq) \rightarrow O_2(aq) + 2\,H_2O\,(l)$$

7. On peut observer un dégagement gazeux de dioxygène qui témoigne de l'avancement de la réaction.

8. À l'état final du système chimique, le test à la soude nous montre, par le précipité vert formé, que les ions fer (II), introduits à l'état initial du système, sont toujours présents.

9. Les résultats expérimentaux mettent en évidence trois paramètres qui influencent la durée d'évolution d'un système chimique :
– la concentration en réactif : lorsque la concentration en réactif augmente, la durée d'évolution du système chimique, siège de la réaction considérée, diminue ;
– la température du système chimique : lorsque la température du système chimique augmente, sa durée d'évolution pour passer de son état initial à son état final diminue ;
– la présence d'un catalyseur : un catalyseur de réaction, ajouté au système chimique dans son état initial, favorise la réaction dont il est le siège, ce qui conduit à réduire sa durée d'évolution entre son état initial et son état final. Le catalyseur n'est d'ailleurs pas affecté par la réaction dans la mesure où on le retrouve inchangé à l'état final du système.

ACTIVITÉ 4

Suivi d'une réaction lente

p. 237

1. La température est un facteur cinétique qui influence la durée d'une réaction. Élever la température conduit donc à diminuer la durée d'évolution du système chimique entre son état initial et son état final.

2. L'usage d'un catalyseur permettrait également d'accélérer la réaction chimique. Toutefois, dans le cas présent, l'acide sulfurique étant une solution aqueuse, l'anhydride acétique réagirait avec l'eau pour se transformer en acide acétique, l'état final du système chimique en serait modifié.

3. Le sous-produit de cette réaction est l'acide éthanoïque qui apparaît également sur le chromatogramme sous la forme d'une tache.

4.

$$n_{(CH_3CO)_2O} = \frac{m_{(CH_3CO)_2O}}{M((CH_3CO)_2O)} = \frac{\rho_{(CH_3CO)_2O} \cdot V_{(CH_3CO)_2O}}{M((CH_3CO)_2O)}$$

soit $n_{(CH_3CO)_2O} = \dfrac{1{,}08 \times 15 \times 10^{-3}}{102} = 1{,}6 \times 10^{-4}$ mol

et

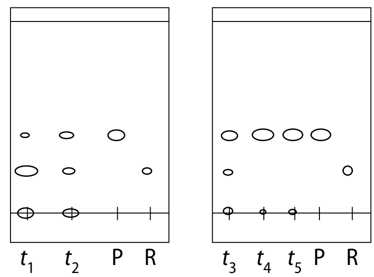
$$n_{alcool} = \frac{m_{alcool}}{M(\text{alcool})} = \frac{\rho_{alcool} \cdot V_{alcool}}{M(\text{alcool})}$$

soit $n_{alcool} = \dfrac{1{,}04 \times 12 \times 10^{-3}}{108} = 1{,}2 \times 10^{-4}$ mol.

En regard de la stœchiométrie de la réaction d'estérification, l'alcool benzylique est le réactif limitant.

5. Les dépôts R et P permettent d'apprécier l'avancement de la réaction. Après élution et par comparaison avec le dépôt correspondant au système chimique à la date considérée, il est possible de vérifier la présence ou l'absence de l'alcool benzylique et de l'éthanoate de benzyle dans le système.

6. On peut observer sur le chromatogramme que le système chimique évolue au cours du temps : jusqu'à la date t_3, réactifs et produits coexistent ; à partir de la date t_4, un des réactifs a été totalement consommé.



7. À la date t_5, le chromatogramme montre que l'alcool benzylique a totalement disparu : c'est donc bien le réactif limitant.

8. À partir de la date t_4, l'alcool benzylique a disparu du chromatogramme. L'état final du système est donc atteint.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *Suivre l'évolution dans le temps d'une réaction chimique*

1 **1. a.** *Faux*. Une réaction est dite rapide si elle se déroule en moins de 1/10 s, durée de la persistance rétinienne.

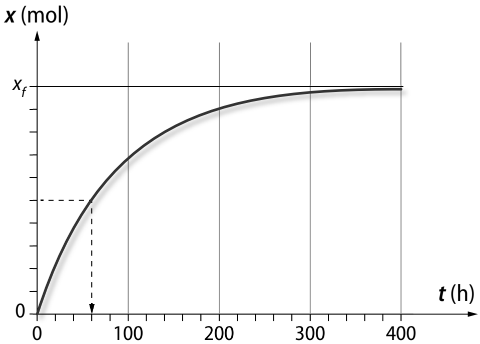
2. *Faux*. Un système cinétiquement inerte est le siège d'une réaction chimique infiniment lente.

3. *Vrai*.

4. *Faux*. Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour que l'avancement de la réaction atteigne la moitié de sa valeur finale.

2 **1.** Le temps de demi-réaction est la durée au terme de laquelle l'avancement de la réaction est égal à la moitié de l'avancement final.

2. À la date $t = t_{1/2}$, on a $x(t_{1/2}) = x_f/2$.
Graphiquement, on lit $t_{1/2} = 60$ h.



3. Relativement au temps de demi-réaction de sa décomposition, au terme d'une durée égale à 12 h, le salicylate de méthyl n'est pratiquement pas dégradé. Cette crème solaire est donc parfaitement adaptée à une exposition de l'ordre d'une demi-journée.

3 L'airbag

Un airbag est constitué d'une enveloppe flexible, qui peut se remplir de diazote gazeux en cas de choc. Ce gaz résulte essentiellement de la composition thermique de l'azoture de sodium (NaN_3) en diazote et en sodium métallique.

1. *Écrire l'équation associée à la décomposition de l'azoture de sodium à 300 °C.*
$2\ NaN_3\ (s) \rightarrow 3\ N_2\ (g) + 2\ Na\ (s)$

2. *Cette réaction est-elle rapide ou lente ? Justifier.*
Cette réaction est nécessairement rapide : il convient que l'airbag se gonfle dès le choc enregistré par l'accéléromètre qui en commande le déclenchement.

4 **1.** D'après le tableau, l'état final est atteint à la date $t = 400$ s.

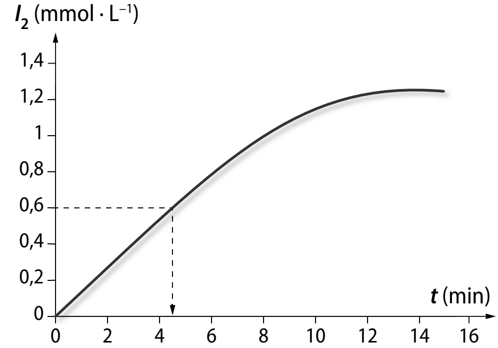
2. a. Graphiquement, on obtient $t_{1/2} = 60$ s.
b. L'état final du système chimique est atteint au terme d'une durée environ égale à 6,5 fois le temps de demi-réaction.

5 **1.** $2\ I^-\ (aq) + H_2O_2\ (aq) + 2\ H^+\ (aq)$
$\rightarrow I_2\ (aq) + 2\ H_2O\ (l)$

2. C'est la coloration du milieu réactionnel en jaune orangé, puis brun au fur et à mesure de la formation du diiode.

3. $n(I^-) = c_1 \cdot V_1 = 5{,}00 \times 10^{-3} \times 5{,}00 \times 10^{-3}$
$= 2{,}50 \times 10^{-5}$ mol.
$n(H_2O_2) = c_2 \cdot V_2 = 5{,}00 \times 10^{-3} \times 2{,}50 \times 10^{-2}$
$= 7{,}50 \times 10^{-5}$ mol.
En regard de la stœchiométrie de la réaction, les ions iodure sont limitants et $x_m = 1{,}25 \times 10^{-5}$ mol.

4.



5. À la date 14 min, $[I_2] = 1{,}25$ mmol · L^{-1} soit :
$$n(I_2) = [I_2] \cdot V = 1{,}25 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-3}$$
$$= 1{,}25 \times 10^{-5}\ \text{mol} = x_m.$$
L'état final du système chimique est donc atteint à cette date.

6. Graphiquement, $t_{1/2} = 4{,}5$ min.

COMPÉTENCE 2 : *Connaître quelques paramètres influençant l'évolution temporelle d'une réaction*

6 **1.** *Faux*. Cela peut aussi revenir à augmenter la durée d'évolution.

2. *Vrai*.

3. *Vrai*.

4. *Vrai*.

7 **1.** $2\ Cu^{2+}\ (aq) + 2\ HO^-\ (aq) + 2\ e^-$
$\rightleftharpoons Cu_2O\ (s) + H_2O\ (l)$
$C_3H_7CO_2^-\ (aq) + 2\ H_2O\ (l) + e^-$
$\rightleftharpoons C_3H_7CHO\ (aq) + 3\ HO^-\ (aq)$
On peut donc écrire :
$2\ Cu^{2+}(aq) + 8\ HO^-\ (aq) + 2\ C_3H_7CHO\ (aq)$
$\rightarrow Cu_2O(s) + 5\ H_2O\ (l) + 2\ C_3H_7CO_2^-\ (aq)$

2. C'est la formation du précipité rouge d'oxyde de cuivre qui nous renseigne sur l'avancement de la réaction, et donc l'évolution temporelle du système chimique.

3. Comme l'attestent les résultats expérimentaux, cette réaction est lente à température ambiante (milieu toujours bleu si maintenu à 20 °C) et est accélérée (apparition du précipité quand le milieu est porté à 40 °C ou à ébullition) lorsque l'on chauffe le milieu réactionnel.

4. Le butanal est sujet à l'oxydation par le dioxygène de l'air. La température est un facteur cinétique : abaisser la température conduit à ralentir la réaction chimique dont est le siège un système. Placer au réfrigérateur le beurre permet donc de ralentir la réaction d'oxydation dont il est l'objet.

8 **1.** C'est le dégagement gazeux de dihydrogène qui nous renseigne sur l'avancement de la réaction, et donc l'évolution temporelle du système chimique.

2. L'état de division d'un réactif est un facteur cinétique : plus le réactif est divisé (poudre, grenaille, fil ou plaque), plus la durée d'évolution du système chimique entre son état initial et son état final est courte. À l'échelle microscopique, la division revient à la multiplication des lieux de réaction. L'état final est atteint plus rapidement sur la courbe ⓐ qu'il ne l'est sur la courbe ⓑ : à la courbe ⓐ correspond donc le zinc le plus divisé, soit la poudre, à la courbe ⓑ, la grenaille.

COMPÉTENCE 3 : *Mettre en évidence le rôle d'un catalyseur*

10 **1. a** et **c.**
Il est à noter que certains catalyseurs notamment biochimiques sont des inhibiteurs de réactions.

2. c.

3. a et **b.**

4. a.

11 **1.** L'avancement final de la réaction considérée correspond à l'asymptote horizontale de la courbe ⓐ, soit $x_f = 0{,}66$ mol.

2. Un catalyseur est une espèce chimique qui accélère ou oriente une réaction chimique sans modifier l'état final du système chimique.

3. L'acide sulfurique est un catalyseur adapté au réaction d'estérification. En modifiant le pH du solvant, il favorise la réaction.

4. En ajoutant un catalyseur dans le milieu réactionnel, l'état final du système chimique demeure inchangé mais est atteint plus rapidement : c'est donc la courbe ⓑ qui traduirait l'évolution d'un tel système au cours du temps.

12 **1.** $2\ H_2O_2\ (aq) \rightarrow O_2\ (aq) + 2\ H_2O\ (l)$.

2. a. La catalyse par le platine est une catalyse hétérogène : catalyseur et réactif ne sont pas dans le même état physique.
b. L'état final du système chimique est atteint plus rapidement lorsque la catalyse est enzymatique.

13 ***Une réaction autocatalytique***
En milieu acide, les ions permanganate MnO_4^- (aq) oxydent lentement l'acide oxalique $C_2H_2O_4$ (aq).
On prépare une même solution dans deux béchers distincts, puis l'on ajoute une spatule de sulfate de manganèse $MnSO_4$ (s) au second bécher. La coloration violette de la solution disparaît alors plus rapidement.

1. *Écrire les demi-équations redox, puis l'équation de la réaction d'oxydoréduction qui se déroule.*
$2\ CO_2\ (aq) + 2\ H^+\ (aq) + 2\ e^- \rightleftharpoons H_2C_2O_4\ (aq)$
$MnO_4^-\ (aq) + 8\ H^+\ (aq) + 5\ e^- \rightleftharpoons Mn^{2+}\ (aq) + 4\ H_2O\ (l)$
On peut donc écrire :
$$2\ MnO_4^-\ (aq) + 5\ H_2C_2O_4\ (aq) + 6\ H^+\ (aq) \rightarrow 2\ Mn^{2+}\ (aq) + 8\ H_2O\ (l) + 10\ CO_2\ (aq)$$

2. *On dit de cette réaction qu'elle est « autocatalytique ». Expliquer pourquoi.*
Si la coloration violette disparaît plus rapidement dans le bécher dans lequel on ajoute une pointe de spatule de dioxyde de manganèse, c'est que ce dernier catalyse la réaction de réduction des ions permanganate. Dans la mesure où les ions manganèse sont produits par cette réaction de réduction, on peut donc penser qu'elle est autocatalysée par l'un de ses produits de réaction.

14 **1.** $I_2(aq) + 2\ e^- \rightleftharpoons 2\ I^-\ (aq)$;
$S_2O_8^{2-}\ (aq) + 2\ e^- \rightleftharpoons 2\ SO_4^{2-}\ (aq)$;
$Fe^{3+}\ (aq) + e^- \rightleftharpoons Fe^{2+}\ (aq)$

2. (1) $2\ I^-\ (aq) + 2\ Fe^{3+}\ (aq) \rightarrow I_2\ (aq) + 2\ Fe^{2+}\ (aq)$

3. (2) $2\ Fe^{2+}\ (aq) + S_2O_8^{2-}\ (aq) \rightarrow 2\ Fe^{3+}\ (aq) + 2\ SO_4^{2-}\ (aq)$

4. (1) + **(2)** : $2\ I^-\ (aq) + S_2O_8^{2-}\ (aq) \rightarrow I_2\ (aq) + 2\ SO_4^{2-}\ (aq)$
On retrouve bien l'équation de la réduction des ions peroxodisulfate par les ions iodure.

5. Un catalyseur, en catalyse homogène, participe activement à la réaction qu'il catalyse. Pour autant, dans la mesure où il y est produit dans les mêmes proportions qu'il y est consommé, il ne figure pas dans son bilan.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

15 **1.** Les catalyseurs utilisés dans un pot catalytique « *facilitent leur réaction* (celles relatives aux gaz d'échappement) *sans pour autant y participer* »

2. Le platine, le rhodium et le palladium sont utilisés dans un pot catalytique.

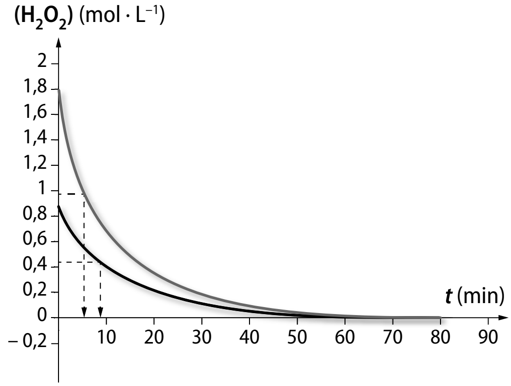
3. Il s'agit d'une catalyse hétérogène, les catalyseurs étant des solides déposés sur une céramique en nid d'abeille, et les réactifs des gaz.

4. Les réactions entre les gaz d'échappement, catalysés par le pot, nécessitent de haute température pour se produire efficacement. D'autre part, le plomb, adjuvant de certains carburants, se dépose sur le catalyseur et diminue notablement son efficacité.

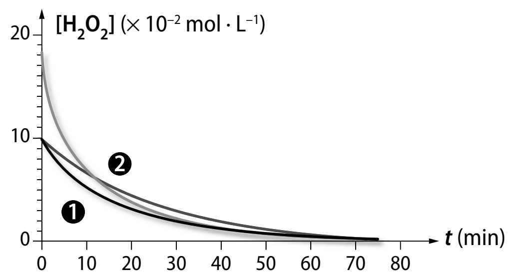
16 **1.** $H_2O_2\ (aq)/\ H_2O\ (l)$

2. La décomposition de l'eau oxygénée à température ambiante est une réaction lente : on peut constater que la diminution de la concentration en eau oxygénée dans le milieu s'inscrit dans la durée. Ce n'est en effet qu'au terme d'une soixantaine de minutes que sa concentration s'annule, ce qui témoigne d'autre part du caractère total de cette réaction.

3. Lorsque la concentration en eau oxygénée augmente, le temps de demi-réaction et donc la durée d'évolution du système chimique sont diminués.



4. La température étant un facteur cinétique, elle influence la durée d'évolution du système chimique. En diminuant la température, on augmente la durée d'évolution du système.



17 **1.** L'acide sulfurique est un catalyseur de réaction.

2. Le montage à reflux permet d'augmenter la température du milieu réactionnel et donc de diminuer la durée de son évolution sans perdre aucun réactif ou produit.

3. La réaction considérée est lente. Pour autant, la connaissance du système chimique, à une date donnée, nécessite de stopper l'évolution de ce système à cette date. On procède donc à son refroidissement.

4. Le prélèvement ❶ laisse apparaître le seul acide salicylique. Celui-ci ayant disparu dans le prélèvement ❸, on peut considérer que l'état final est certainement atteint à la date $t = 15$ min.

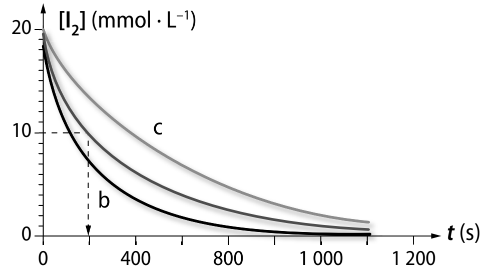
18 **1.** Le diiode confère une coloration orangée aux solutions qui le contiennent. Sa disparition progressive pourra donc être suivie par spectrophotométrie.

2. Graphiquement, on lit $t_{1/2} = 180$ min.

3. La température étant un facteur cinétique, elle influence la durée d'évolution du système chimique. En l'augmentant, on diminue la durée d'évolution du système (courbe **b**).

4. **a.** $C' = \dfrac{C_0 \cdot V}{V'} = \dfrac{2{,}0 \times 10^{-2} \times 50}{100} = 1{,}0 \times 10^{-2}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

b. La concentration étant un facteur cinétique, elle influence la durée d'évolution du système chimique. En la diminuant, on augmente la durée d'évolution du système (courbe **c**).



19 **1.** La température est un facteur cinétique : lorsque la température augmente, la durée d'évolution du système chimique entre son état initial et son état final diminue. Un bain à 40 °C permet donc de diminuer la durée d'évolution du système considéré.

2. **a.** La concentration en réactif est un facteur cinétique ; lorsqu'elle augmente, la durée d'évolution du système chimique de son état initial à son état final diminue. Le système (2) évoluera donc plus rapidement vers son état final que le système (1).

b. Soit le système (1) :
$n(I^-) = c_1 \cdot V_1 = 5{,}0 \times 10^{-1} \times 20{,}0 \times 10^{-3} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol.
$n(S_2O_8^{2-}) = c_2 \cdot V_2 = 1{,}0 \times 10^{-1} \times 20 \times 10^{-3} = 2{,}0 \times 10^{-3}$ mol.
En regard de la stœchiométrie de la réaction, les ions peroxodisulfate sont limitants.
Dans le système (2), les ions iodure seront introduits dans un plus large excès. L'état final, conditionné par la quantité de matière initiale du réactif limitant, demeure donc inchangé.

20 **1.** Une réaction est lente si l'évolution temporelle de l'un des paramètres physiques du milieu réactionnel, par exemple la couleur, peut être suivie à l'œil nu ou avec un appareil de mesure dédié (un spectrophotomètre).

2. Les ions cobalt (III) confèrent aux solutions aqueuses qui les contiennent une coloration verte, un suivi spectrophotométrique dans le domaine du visible est donc adapté au suivi temporel de leur concentration dans le système considéré.

3. Dans les zones ❶ et ❺, en regard de la faible concentration en ions cobalt (III), on peut considérer que la coloration du milieu est rose. En revanche, dans la zone ❸, où la concentration en ion cobalt (III) est maximale, la couleur de la solution sera verte.

4. a. H_2O_2 (aq) + 2 H^+ (aq) + 2 e^- $\rightleftharpoons$ 2 H_2O (l) ;
4 CO_2 (aq) + 8 H^+ (aq) + 10 e^- $\rightleftharpoons$ $C_4H_4O_6^{2-}$ (aq) + 2 H_2O (l)
et Co^{3+} (aq) + e^- $\rightleftharpoons$ Co^{2+} (aq)

Dans la zone ❷, les ions cobalt (II) sont oxydés nécessairement par l'eau oxygénée, selon :

$$2\ Co^{2+}\ (aq) + H_2O_2\ (aq) + 2\ H^+\ (aq) \rightarrow 2\ Co^{3+}\ (aq) + 2\ H_2O\ (l).$$

Dans la zone ❹, les ions cobalt (III) sont réduits nécessairement par les ions tartrate, selon :

$$C_4H_4O_6^{2-}\ (aq) + 2\ H_2O\ (l) + 10\ Co^{3+}\ (aq) \rightarrow 4\ CO_2(aq) + 8\ H^+\ (aq) + 10\ Co^{2+}\ (aq).$$

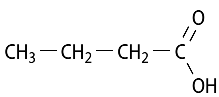
b. La réaction d'oxydation des ions cobalt (II) est plus rapide que la réaction de réduction des ions cobalt (III) comme l'atteste la variation de la concentration en ions cobalt (III) dans le milieu, qui augmente rapidement au cours du temps dans la zone ❷ et diminue lentement dans la zone ❹.

5. La concentration en ions cobalt (III) est nulle à l'état initial du système et tend vers cette même valeur à l'état final. Si, au cours d'une étape de la transformation l'oxydation des ions cobalt (II) a permis leur formation, une autre étape a vue leur consommation.

6. Un catalyseur n'influence pas l'état final du système chimique. La quantité de matière de dioxyde de carbone produite est donc identique avec ou sans catalyseur.

7. La catalyse est qualifiée d'homogène puisque catalyseur et réactif sont dans le même état physique.

21 **1.** L'acide butanoïque est un acide carboxylique et le méthanol un alcool de formules développées respectives



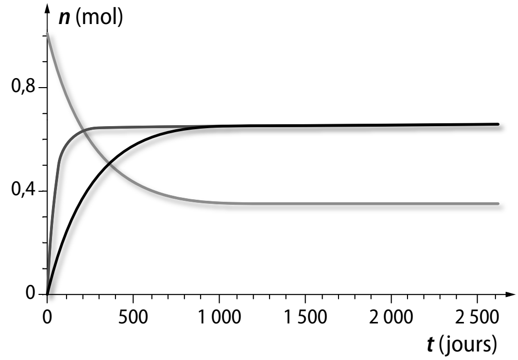
et CH_3–OH

2. En regard de la stœchiométrie de la réaction, on peut écrire :

$n_C(t) = x(t)$
et $n_A(t) = n_A(0) - x(t)$
donc $n_C(t) = n_A(0) - n_A(t)$.

3. a. La courbe « verte », puisque croissante, figure l'évolution de la quantité de matière de butanoate de méthyle au cours du temps.
b. Graphiquement, l'état final correspond à l'asymptote horizontale à la courbe « verte ». On peut considérer qu'il est atteint à la date 1 500 jours. L'avancement final est $x_f = 0{,}67$ mol.
c. Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour que l'avancement de la réaction atteigne la moitié de sa valeur finale. $x(t_{1/2}) = 0{,}33$ mol, soit $t_{1/2} = 140$ jours.

4. a. À température ambiante, cette réaction est beaucoup trop lente pour présenter un quelconque intérêt industriel.
b. Pour écourter la durée de cette synthèse, on peut ajouter au milieu réactionnel un catalyseur de réaction ou travailler à température plus élevée.
c.



22 **1.** $2\ H_2O_2\ (aq) + C_8H_7N_3O_2\ (aq) + 6\ HO^-\ (aq) \rightarrow 4\ HO^-\ (aq) + 4\ H_2O\ (l) + C_8H_5NO_4^{2-}\ (aq) + N_2\ (g).$

2. Le dégagement gazeux de diazote.

3. D'après la loi des gaz parfaits, on peut écrire :

$$n_{air} = \frac{P_0 \cdot V_{gaz}}{R \cdot T}.$$

4. a. $P = \dfrac{(n_{air} + n_{N_2}) \cdot R \cdot T}{V_{gaz}}$

b. $P - P_0 = \dfrac{(n_{air} + n_{N_2}) \cdot R \cdot T}{V_{gaz}} - \dfrac{n_{air} \cdot R \cdot T}{V_{gaz}}$

$$= \frac{n_{N_2} \cdot R \cdot T}{V_{gaz}}$$

5. $n(\text{luminol}) = \dfrac{m(\text{luminol})}{M(\text{luminol})} = \dfrac{1{,}0}{177}$
$= 5{,}7 \times 10^{-3}$ mol.

$n(H_2O_2) = c \cdot V = 5{,}6 \times 0{,}50 \times 10^{-3} = 2{,}8 \times 10^{-3}$ mol.
En regard de la stœchiométrie de la réaction, le peroxyde d'hydrogène est le réactif limitant et :

$$x_{max} = 1{,}4 \times 10^{-3}\ \text{mol}.$$

6. a. En regard de la stœchiométrie de la réaction :

$$x(t) = n_{N_2}(t).$$

On a donc $x(t) = \dfrac{(P - P_0) \cdot V_{gaz}}{R \cdot T}$.

b. $x_{max} = \dfrac{1\,660 \times 2{,}1 \times 10^{-3}}{8{,}314 \times 300} = 1{,}4 \times 10^{-3}$ mol.

7. Graphiquement, on lit $t_{1/2} = 3{,}0$ s.

8. Un catalyseur est une espèce chimique qui accélère ou oriente une réaction chimique sans modifier l'état final du système chimique qui en est le siège.

9. L'hémoglobine transporte des ions fer (II). Des traces de sang sont donc susceptibles de catalyser la réaction entre l'eau oxygénée et le luminol : l'émission de lumière bleutée révèle leur présence.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

23 **1.** La seule espèce susceptible d'absorber de la lumière dans le domaine du visible est l'ion permangante, qui confère aux solutions aqueuses qui le contiennent une coloration violette. On a donc $A = k\,[MnO_4^-]$.

2. La courbe $A = f(t)$ s'annule à la date $t = 500$ s. Comme l'implique la relation ci-dessus, l'espèce responsable de l'absorbance a donc totalement disparu. L'ion permangante est de fait le réactif limitant.

3. En regard de la stœchiométrie de la réaction, on a :

$$x_f = \frac{c_1 \cdot V_1}{2} = \frac{9{,}5\times10^{-4}\times1{,}00\times10^{-3}}{2} = 4{,}8\times10^{-7}\ \text{mol}$$

comme l'atteste par ailleurs la courbe $x = f(t)$.

4. En regard de la stœchiométrie de la réaction, on peut écrire que :

$$n(Mn^{2+}) = 2\,x_f = 2\times4{,}8\times10^{-7} = 9{,}6\times10^{-7}\ \text{mol.}$$

Or, on sait :

$$\left[Mn^{2+}\right] = \frac{n(Mn^{2+})}{V_1+V_2} = \frac{9{,}6\times10^{-7}}{2{,}00\times10^{-3}} = 4{,}8\times10^{-5}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}.$$

5. À la date t, la vitesse volumique de réaction est proportionnelle (de facteur $1/V$ avec $V = V_1 + V_2$) au coefficient directeur de la tangente (dx/dt) à la courbe $x = f(t)$ à cette même date. À volume constant, l'évolution au cours du temps des coefficients directeurs des tangentes successives à cette courbe nous indique l'évolution temporelle de la vitesse volumique de réaction.

6. La concentration en réactif est un facteur cinétique : la vitesse volumique de réaction augmente quand la concentration en réactif augmente, ce qui implique que la durée d'évolution du système entre son état initial et son état final diminue.

7. Jusqu'à la date $t = 330$ s, la vitesse volumique de réaction augmente, comme l'attestent les valeurs croissantes des coefficients directeurs des tangentes à la courbe jusqu'à cette date. Par la suite, la vitesse volumique de réaction diminue jusqu'à s'annuler à partir de $t = 500$ s. Le fait que la vitesse volumique de réaction augmente dans un premier temps va à l'encontre de la réponse à la question **6**. En effet, la concentration en réactif dans le milieu diminue continuement au cours de la réaction, il devrait en être de même de la vitesse de réaction.

8. Si l'un des produits de cette réaction est un catalyseur de cette réaction, alors il est envisageable d'un point de vue cinétique, que dans un premier temps, la catalyse l'emporte sur la diminution de la concentration en réactif… par la suite, c'est l'inverse qui se produit, la catalyse ne peut compenser la disparition des réactifs et la baisse de leur concentration respective.

1 **A. 1. a.** Le mouvement du palet sera étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

b. Le système est le palet. Il est un système pseudo-isolé quand au départ il est immobile et donc son vecteur quantité de mouvement est nul.

Les actions mécaniques qui s'exercent sur lui se compensent.

On peut écrire $\vec{R}+\vec{P}=\vec{0}$ avec $\vec{R}$ la force de réaction qui modélise l'action du sol sur le palet et $\vec{P}$ le poids du palet.

2. a. Dans la phase de lancement où le palet subit en plus une action mécanique modélisée par la force $\vec{F}$, d'après la deuxième loi de Newton, on peut écrire :

$$\vec{F}+\vec{R}+\vec{P}=\frac{d\vec{p}}{dt}.$$

Comme d'après **1.b**, $\vec{R}+\vec{P}=\vec{0}$, on en déduit que :

$$\vec{F}=\frac{d\vec{p}}{dt}=m\cdot\frac{d\vec{v}}{dt}=m\cdot\vec{a}.$$

Comme $\vec{F}$ est constante, l'accélération $\vec{a}$ est aussi constante.

Donc le mouvement du palet est uniformément accéléré.

Comme le vecteur vitesse $\vec{v}$ et le vecteur accélération $\vec{a}$ sont dans la même direction, le mouvement du palet est rectiligne uniformément accéléré.

b. D'après la deuxième loi de Newton, on a :

$$\vec{F}=\frac{d\vec{p}}{dt}=m\cdot\frac{d\vec{v}}{dt}=m\cdot\vec{a}\ \text{ donc }\ \vec{a}=\frac{d\vec{v}}{dt}=\frac{\vec{F}}{m}.$$

On projette selon un axe horizontale orienté selon $\vec{F}$.

On peut donc écrire que $a=\frac{dv}{dt}=\frac{F}{m}$.

On en déduit que $v=\frac{F}{m}\cdot t$.

Donc $v=a\cdot t$.

À $t=t_L$, $v_L=a\cdot t_L$.

Donc $a=\frac{v_L}{t_L}$.

A. N. : $a=\frac{2,1}{3,0}=0,7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

c. $F=m\cdot a$.

A.N. : $F=20\times 0,7=14$ N.

3. Pour $t>3,0$ s, l'action mécanique du joueur modélisée par $\vec{F}$ ne s'applique plus.

Les actions mécaniques qui s'exercent sur le palet se compensent, le palet est donc un système pseudo-isolé et d'après la première loi de Newton, son vecteur quantité de mouvement se conserve : le mouvement du palet est rectiligne uniforme de vitesse $v=v_L=2,1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

B. 1. a. $\Delta E_c=0-\frac{1}{2}\,m\cdot v_L^{\,2}$.

A.N. : $\Delta E_c=-\frac{1}{2}\times 20\times 2,1^2=-44$ J.

b. La variation d'énergie cinétique d'un solide, sur un déplacement AB, est égale à la somme des travaux des forces qui modélisent les actions mécaniques qui agissent sur le solide : $\Delta E_{c(AB)}=\Sigma W_{AB}(\vec{F})$.

2. a. Par définition : $W_{AB}(\vec{f})=\vec{f}\cdot\vec{AB}$.

$\vec{f}$ et $\vec{AB}$ sont colinéaires et de sens opposés :

$$W_{AB}(\vec{f})=-f\cdot AB=-f\cdot d.$$

Comme $W_{AB}(\vec{f})<0$, le travail est résistant.

b. La force de réaction $\vec{R}$, qui modélise l'action du sol sur le palet, et le poids $\vec{P}$ du palet sont perpendiculaires à la direction du déplacement, donc leur travail est nul.

3. On a donc $\Delta E_c=-f\cdot d$

donc $f=-\frac{\Delta E_c}{f}$.

A.N. : $f=\frac{44}{40}=1,1$ N.

4. $\vec{R}+\vec{P}+\vec{F'}+\vec{f}=m\cdot\frac{d\vec{p}}{dt}$

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

On projette $F'-f=m\cdot a$.

Donc $F'=m\cdot a+f=F+f$.

A.N. : $F'=14+1,1=15$ N.

2 **1.** Enregistrement 1 : condition **b**. Régime pseudo-périodique.

Enregistrement 2 : condition **c**. Régime apériodique.

Enregistrement 3 : condition **a**. Régime périodique.

2. a. Sur l'enregistrement 3, on mesure la durée de 3 périodes sur l'un des enregistrements pour en déduire la valeur d'une période : $3\,T_0=3,0$ s donc $T_0=1,0$ s.

b. $F=k\cdot x=m\cdot a$ donc $k=\frac{m\cdot a}{x}$,

donc $[k]=\frac{\text{M}\cdot\text{L}\cdot\text{T}^{-2}}{\text{L}}=\text{M}\cdot\text{T}^{-2}$

et $[m]=\text{M}$.

$T_0=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ a donc la dimension de T, donc vrai.

$T_0=2\pi\sqrt{\frac{k}{m}}$ a donc la dimension de T^{-1}, donc faux.

$T_0=2\pi\frac{m}{k}$ a donc la dimension de T^2, donc faux.

c. $T_0=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

donc $k=m\cdot\frac{4\,\pi^2}{T_0^2}$.

A.N. : $k=0,100\times\frac{4\,\pi^2}{1,0^2}=4,0\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$.

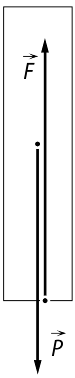
3. a. $E_P=\frac{1}{2}\,k\cdot x^2$ et $E_c=\frac{1}{2}\,m\cdot v^2$.

b. $E_m=E_c+E_p$.

c. Dans le cas d'un régime périodique où les frottements sont négligeables, on peut considérer que l'énergie mécanique E_m est constante.
d. À $t = 0$ s, $v(0) = 0$ donc $E_c = 0$.
Donc $E_m = E_P = \frac{1}{2} k \cdot x_m^2$.
A.N. : $E_m = 0{,}5 \times 4{,}0 \times 0{,}10^2 = 2{,}0 \times 10^{-2}$ J = 20 mJ.
e. Au passage par la position d'équilibre, $x = 0$.
Donc $E_m = E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ donc $v = \sqrt{\frac{2\,E_m}{m}}$.
A.N. : $v = \sqrt{\frac{2 \times 20 \times 10^{-3}}{0{,}100}} = 0{,}63$ m · s^{-1}.

4. ❶ énergie mécanique ;
❷ énergie potentielle ;
❸ énergie cinétique.
Dans le cas d'un régime pseudo-périodique, il y a des frottements qui dissipent de l'énergie (travail des forces de frottements).

3 **1.**



$\vec{F}$ force de poussée
$\vec{P}$ poids
2. D'après la deuxième loi de Newton, $\vec{F} + \vec{P} = m \cdot \vec{a}$.
On projette sur l'axe (Oz) : $F - m \cdot g_0 = m \cdot a$.
Donc $a = \frac{F}{m} - g_0$.
3. a. Au décollage : $a_1 = \frac{F}{m_1} - g_0$.
A.N. : $a_1 = \frac{2\,445}{208} - 9{,}8 = 1{,}95$ m · s^{-2}.
b. $a_2 = \frac{F}{m_2} - g_0$
$m_2 = m_1 - m_{\text{peroxyde d'azote}}$
A.N. : $m_2 = 208 - 147{,}5 = 60{,}5$ tonnes.
$a_2 = \frac{2\,445}{60{,}5} - 9{,}8 = 30{,}6$ m · s^{-2}.
c. La valeur de l'accélération n'est pas constante, donc le mouvement n'est pas uniformément accéléré.
La somme des forces est constante mais la masse de la fusée varie, donc la valeur de l'accélération change au cours du temps. Le mouvement n'est pas uniformément accéléré.

4. a. $v_g = \frac{\Delta t}{\Delta m} \cdot F$
$[F] = \text{M} \cdot \text{L} \cdot \text{T}^{-2}$
donc on a $[v_g] = \text{L} \cdot \text{T}^{-1}$.
v_g a bien la dimension d'une vitesse.
b. En $\Delta t = 145$ s, $|\Delta m| = 147{,}5$ tonnes.
A.N. : $v_g = \frac{145}{147{,}5 \times 10^3} \times 2\,445 \times 10^3 = 2{,}40 \times 10^3$ m · s^{-1}.
c. $\Delta t / \Delta m$ est négatif puisque comme il y a perte de masse, $\Delta m < 0$ donc $\frac{\Delta t}{\Delta m} < 0$.
d. $\vec{v_g}$ est dirigé dans le sens contraire de $\vec{F}$, donc orienté vers le bas.

5. D'après la troisième loi de Newton ou principe des actions réciproques, donc les moteurs exercent sur les gaz une action mécanique modélisée par une force verticale vers le bas, les gaz exercent sur la fusée une action mécanique modélisée par une force verticale vers le haut de même valeur.

4 **1. a.** Le référentiel d'étude est le référentiel géocentrique supposé galiléen.
b. Le système d'étude est le satellite.
D'après la deuxième loi de Newton, on peut écrire :
$$\text{d}\vec{p}/\text{d}t = \vec{F}_{T/S}$$
donc $m \cdot \text{d}\vec{v}/\text{d}t = (\text{G} \cdot m \cdot M_T/r^2) \cdot \vec{u}_{ST}$
donc $\vec{a} = (\text{G} \cdot M_T/r^2) \cdot \vec{u}_{ST}$.
c. Le vecteur accélération est dirigé vers le centre de la trajectoire circulaire du satellite et le vecteur vitesse est tangent à cette trajectoire : $\vec{v} \cdot \vec{a} = 0$, donc le mouvement du satellite est circulaire uniforme.

2. Dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme, la valeur de l'accélération a et celle de la vitesse v sont reliées par la relation : $a = v^2/r$.
D'après ce qui précède, comme le mouvement est circulaire uniforme :
$$a = \text{G} \cdot M_T/r^2 = v^2/r.$$
On peut donc en déduire l'expression de la vitesse :
$$v = \sqrt{\frac{\text{G} \cdot M_T}{(R_T + h)}}.$$
3. D'après le texte, pour $h = 20\,180$ km, on a :
$$v = 14\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$
$v = \sqrt{\frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}98 \times 10^{24}}{(6\,380 + 20\,180) \times 10^3}} = 3{,}88 \times 10^3$ m · s^{-1}
$= 14{,}0 \times 10^3$ km · h^{-1}.
Donc la vitesse donnée dans le texte est compatible avec l'altitude.
D'après le texte, pour $h = 20\,180$ km, on a $T = 12$ h.

$$T = \frac{2\pi(R_T + h)}{v} = \frac{2\pi(R_T+h)}{\sqrt{\frac{G \cdot M_T}{(R_T+h)}}} = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T+h)^3}{M_T \cdot G}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(6\,380\times10^3 + 20\,180\times10^3)^3}{5{,}98\times10^{24}\times6{,}67\times10^{-11}}}$$

$= 4{,}30 \times 10^4$ s $= 12{,}0$ h.

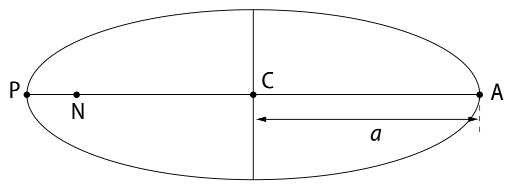
Donc la période donnée dans le texte est compatible avec l'altitude.

4. Comme la période du satellite n'est pas de 24 h, ce n'est pas un satellite géostationnaire.

5 **1.** Le référentiel est : **c.** neptunocentrique.

2. Première loi de Kepler : dans le référentiel neptunocentrique, la trajectoire du satellite Néréide est une ellipse dont le centre de Neptune occupe un des deux foyers.
Deuxième loi de Kepler : le segment reliant Neptune à Néréide balaie des aires égales pendant des durées égales.

3.



4. a. D'après la deuxième loi de Kepler, ces aires sont égales.
b. Les morceaux d'orbite P_1P_2 et A_1A_2 sont parcourues pendant la même durée Δt.
Comme $P_1P_2 > A_1A_2$, $v_P > v_A$.

5. a. Troisième loi de Kepler :

$$T^2_{ner}/a^3 = 4\pi^2/(G \cdot M) = \text{constante.}$$

b. $\dfrac{T^2_{rev}}{R_1^3} = \dfrac{(5{,}877\times86\,400)^2}{3{,}547\times10^5\times10^3} = 5{,}78 \times 10^{-15}\ \text{s}^2\cdot\text{m}^{-3}$.

c. On peut écrire que (troisième loi de Kepler) :

$$\frac{T^2_{ner}}{a^3} = \text{cte} = \frac{T^2_{rev}}{R_1^3}$$

donc $T^2_{ner} = a^3 \cdot \dfrac{T^2_{rev}}{R_1^3}$.

A.N. : $T^2_{ner} = (5\,513 \times 10^3)^3 \times 5{,}78 \times 10^{-15}$ donc :

$$T_{ner} = 360 \text{ jours solaires.}$$

La valeur donnée dans le texte est bien de 360 jours.

6 **1.** Phénomènes naturels permettant à l'Homme de mesurer l'écoulement du temps :
– alternances des jours et des nuits ;
– alternances des phases de la Lune ;
– alternances des saisons ;

2. « Le skieur a effectué la descente en 76 s ». Concept associé : la durée.
« Le train est entré en gare à 6 h 48 min ». Concept associé : le temps.
Une horloge mesure un temps mais peut aussi mesurer une durée qui est une différence entre deux temps.

3. a. Les qualités du phénomène commandant le fonctionnement d'une horloge :
– phénomène reproductible ;
– phénomène périodique non amorti.
b. Types d'horloges utilisées au cours de l'histoire pour mesurer des intervalles de temps :
– sablier, clepsydre ;
– horloge à balancier, montre à ressort ;
– montre à quartz, horloge atomique.

4. Actuellement, on définit la seconde à partir de la fréquence de transition entre deux niveaux de l'atome de césium 133.

7 Les rayons cosmiques sont constitués de neutrons qui se propagent à une vitesse proche de celle de la lumière : $0{,}999\,999\,999\,999\,995 \times c$.
Leur durée de vie propre est d'environ 1 000 s.

1. a. La durée de vie propre est d'environ $\Delta t_p = 1\,000$ s.
La durée mesurée est $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p$ avec $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$.
A.N. : $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$
$= 1/(1 - 0{,}999\,999\,999\,999\,995^2)^{1/2} = 10^6$.
Donc $\Delta t_m = 10^9$ s.
b. On en déduit la distance que peut parcourir un neutron cosmique dans l'espace :

$$d = v \cdot \Delta t_m.$$

A.N. : $d = 0{,}999\,999\,999\,999\,995 \times 3{,}00 \times 10^8 \times 10^9$
$= 3{,}00 \times 10^{17}$ m.

2. a. Une année de lumière est la distance parcourue par la lumière en une année :
1 a.l $= 3{,}00 \times 10^8 \times 365 \times 24 \times 3\,600 = 9{,}46 \times 10^{15}$ m.
On en déduit la distance que peut parcourir un neutron cosmique dans l'espace en année de lumière :

$$d = 3{,}00 \times 10^{17} = 31{,}7 \text{ a.l.}$$

Donc un tel neutron peut provenir de l'étoile Alpha du Centaure, étoile la plus proche de la Terre dont la distance est de 4 années de lumière.
b. Durée du trajet :
– pour un observateur terrestre : environ 4 années ;
– pour le neutron :
10^6 fois moins donc $4 \times 365 \times 24 \times 3\,600/10^6 = 126$ s.

8 **1.** MnO_4^- (aq) + 8 H^+ (aq) + 5 e^- $\rightleftharpoons$ Mn^{2+} (aq) + 4 H_2O (l)
C_3H_6O + 2 H^+ (aq) + 2 e^- $\rightleftharpoons$ C_3H_8O.
L'équation de la réaction étudiée s'écrit donc :
2 MnO_4^- (aq)+ 10 H^+ (aq) + 5 C_3H_8O (l)
$\rightarrow$ 2 Mn^{2+} (aq) + 8 H_2O (l) + 5 C_3H_6O (l).

2. a. L'ion permanganate est violet en solution aqueuse. La concentration de ce réactif diminue au cours du temps et donc la coloration de la solution s'atténue.
b. On aurait donc pu également suivre la cinétique de cette réaction par spectrophotométrie.

3. Le dosage a pour objet de déterminer la concentration en ions permanganate à une date donnée. Pour cela, on doit stopper la réaction lente à laquelle ils participent. On dilue donc le milieu réactionnel par de l'eau glacée : la concentration étant un facteur cinétique, tout comme la température, la durée d'évolution du système chimique augmente et on peut considérer qu'il est cinétiquement inerte le temps du dosage.

4. Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour que le système atteigne la moitié de son avancement final. Sa détermination graphique nécessite au préalable le calcul de l'avancement final de la réaction étudiée.
$n(MnO_4^-) = 0{,}20 \times 50 \times 10^{-3} = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol.

$$n(C_3H_8O) = \frac{m(C_3H_8O)}{M(C_3H_8O)} = \frac{\rho(C_3H_8O) \cdot V}{M(C_3H_8O)} = 1{,}3 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

En regard de la stœchiométrie de la réaction, le propan-2-ol est le réactif limitant et l'avancement final :

$x_f = 2{,}6 \times 10^{-3}$ mol (vérifié graphiquement).

On a donc $x(t_{1/2}) = 1{,}3 \times 10^{-3}$ mol.
Graphiquement, on peut lire $t_{1/2} = 2{,}8$ min.

5. L'expérience 2 est réalisée à une température inférieure à celle de l'expérience 1. Lorsque la température décroît, la durée d'évolution du système chimique augmente : l'avancement final est donc atteint à une date ultérieure.
L'expérience 3 est réalisée à la même température que l'expérience 1 mais la concentration en ions permanganate est augmentée. Lorsque la concentration en réactif croît, la durée d'évolution du système chimique décroît : l'avancement final de la réaction est atteint plus rapidement.

6. L'usage d'un catalyseur de réaction est un facteur cinétique : il conduit à diminuer la durée d'évolution du système chimique mais ne modifie en rien l'état final du système considéré. La courbe **b** ne traduit donc pas l'évolution d'un tel système chimique.

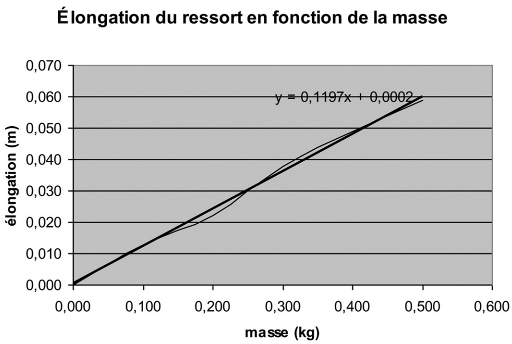
→ Enseignement spécifique, p. 254

Étude d'oscillateurs

1. a.

	A	B
1	m (kg)	L-Lo (m)
2	0,000	0,000
3	0,100	0,013
4	0,200	0,022
5	0,300	0,038
6	0,400	0,049
7	0,500	0,059

b.



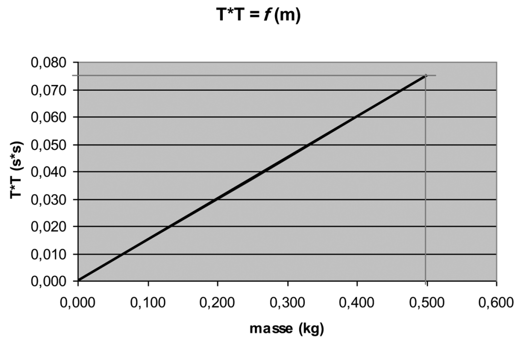
En modélisant la courbe obtenue par une droite, on obtient une courbe de tendance d'équation :

$$\Delta L = 0{,}120\,m \quad \text{donc} \quad m/\Delta L = 8{,}33.$$

Comme $F = k \cdot \Delta L$, on a $m \cdot g = k \cdot \Delta L$.

Donc $k = m \cdot g/\Delta L = 9{,}8 \times 8{,}33 = 82$ USI.

2.



3. a. Pour une masse donnée, on mesure la valeur de T en mesurant plusieurs valeurs de T et ceci plusieurs fois.

Pour $m = 0{,}500$ kg, on mesure :

10 *T* (s)	2,7	2,6	2,7	2,8
***T* (s)**	0,27	0,26	0,27	0,28

$T = 0{,}27$ s.

$T^2 = 0{,}073$ s^2.

b. La valeur est reportée sur la courbe.

4.