

# Sciences physiques

## Spécialité SI

### GUIDE PÉDAGOGIQUE

PROGRAMME 2020 • Collection Bellier • Lescure



Sous la direction de

Jean-Philippe BELLIER

Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Nicolas LESCURE

Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Thierry BAUDOIN

Lycée Victor-Louis à Talence

Patrice BOUDEY

Lycée de la mer à Gujan-Mestras

Sylvie BERTIN

Lycée de Borda à Dax

Thierry DULAURANS

Lycée Fernand-Daguin à Mérignac

Stéphanie BIGORRE

Lycée Alfred-Kastler à Talence

Cyrille LÉMONIE

Lycée Saint-Exupéry à Terrasson-Lavilledieu

Marc BIGORRE

Lycée des Graves à Gradignan

Bruno POUDENS

Lycée des Graves à Gradignan

# AVERTISSEMENT

Vous venez de télécharger gratuitement le fichier pédagogique du Manuel Sciences physiques T<sup>e</sup> Spécialité SI, édition 2020.

Nous vous rappelons qu'il est destiné à un **usage strictement personnel**. Il ne peut ni être reproduit, ni être mutualisé sur aucun site (site d'établissement, site enseignant, blog ou site de peer to peer), même à titre gracieux.

Deux raisons principales :

– **Éviter de rendre le fichier accessible aux élèves dans les moteurs de recherche.**

– **Respecter pleinement le droit d'auteurs** : en effet, l'ensemble des guides pédagogiques et livres du professeur mis à votre disposition sont des œuvres de l'esprit protégées par le droit de la propriété littéraire et artistique.

*Nous vous rappelons que selon les articles L 331-1 et L 335-4 du Code de la propriété intellectuelle, toute exploitation non autorisée de ces œuvres constitue un délit de contrefaçon passible de sanctions de natures pénale et civile, soit trois ans d'emprisonnement et 300 000 euros d'amende.*

Maquette intérieure : Soft Office

Composition : Soft Office

Schémas : Soft Office

Édition : Nathalie Legros

[www.hachette-education.com](http://www.hachette-education.com)

© Hachette Livre 2020

58, rue Jean Bleuzen – 92178 Vanves Cedex

**hachette**  
ÉDUCATION



## Mouvement et interactions

- 1 Mouvement et deuxième loi de Newton ..... 5
- 2 Mouvement dans un champ uniforme .... 15
- 3 Mouvement dans un champ de gravitation ..... 29



## L'énergie : conversions et transferts

- 4 Premier principe de la thermodynamique et bilan énergétique ..... 37
- 5 Transferts thermiques ..... 45



## Ondes et signaux

- 6 Sons et effet Doppler ..... 55
- 7 Diffraction et interférences ..... 65
- 8 La lumière : un flux de photons ..... 73



# 1

# Mouvement et deuxième loi de Newton

## Programme officiel

### Mouvement et interactions

Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<b>1. Décrire un mouvement</b>	
Vecteurs position, vitesse et accélération.	Définir le vecteur vitesse comme la dérivée du vecteur position par rapport au temps et le vecteur accélération comme la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps. Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées du vecteur position et/ou du vecteur vitesse.
Coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour un mouvement circulaire.	Citer et exploiter les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire.
Mouvement rectiligne uniformément accéléré. Mouvement circulaire uniforme.	Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré, circulaire, circulaire uniforme. <i>Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie pour déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération.</i> <b>Capacité numérique :</b> Représenter des vecteurs accélération d'un point lors d'un mouvement, à l'aide d'un langage de programmation. <b>Capacité mathématique :</b> Dériver une fonction.
<b>2. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement</b>	
<b>Deuxième loi de Newton</b> Centre de masse d'un système.  Référentiel galiléen. Deuxième loi de Newton. Équilibre d'un système.	Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système, cette position étant donnée.  Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié. Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées pour en déduire : – le vecteur accélération du centre de masse, les forces appliquées au système étant connues ; – la somme des forces appliquées au système, le mouvement du centre de masse étant connu.

### Liens avec le programme officiel de première (enseignement de spécialité)

Vocabulaire associé	Connaissances et savoir-faire	Modèles / Relations
<ul style="list-style-type: none"> <li>Force.</li> <li>Champs.</li> <li>Vecteur variation de vitesse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliser les expressions vectorielles :               <ul style="list-style-type: none"> <li>– de la force de gravitation et du champ de gravitation ;</li> <li>– de la force électrostatique et du champ électrostatique.</li> </ul> </li> <li>Expression du vecteur variation de vitesse entre deux positions successives.</li> <li>Lien entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci.</li> <li>Influence de la masse du système.</li> </ul>	$\vec{F}_{A/B} = -G \times \frac{m_A \times m_B}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ $\vec{F}_g = m_B \vec{G}$ $\vec{G} = -G \times \frac{m_A}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ $\vec{F}_{A/B} = -k \times \frac{q_A q_B}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ $\vec{F}_e = q_B \vec{E}$ $\vec{E} = -k \times \frac{q_A}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ $(\Delta \vec{v})_{i \rightarrow i+1} = \vec{v}_{i+1} - \vec{v}_i$ $\sum \vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$

## Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Les grandeurs  $x(t)$ ,  $v(t)$ , ..., dépendant du temps sont notées par commodité d'écriture  $x$ ,  $v$ , etc.

Afin d'assurer une continuité pédagogique avec l'expression du vecteur variation de vitesse utilisée en classe de première, enseignement de spécialité, le vecteur accélération est défini par l'intermédiaire d'une dérivée « après » :  $\vec{a}_{i+1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\Delta \vec{v})_{i \rightarrow i+1}}{\Delta t} = \left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right)_{t_{i+1}}$

**Vu en première**

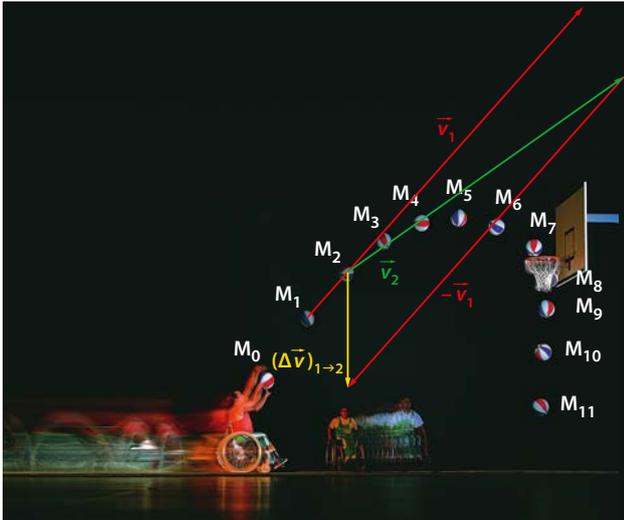
## Le mouvement d'un système

p. 8

### Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo de cours :  
Tracé d'un vecteur variation de vitesse

#### 1. Construction des vecteurs $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ :



Avec l'échelle des valeurs de vitesse choisie ( $1 \text{ cm} \leftrightarrow 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) :

- $\vec{v}_1$  est représenté par un segment fléché, tangent à la trajectoire, dirigé dans le sens du mouvement et de longueur 5,5 fois plus grande que celle du segment d'échelle ;
- $\vec{v}_2$  est représenté par un segment fléché, tangent à la trajectoire, dirigé dans le sens du mouvement et de longueur 4,6 fois plus grande que celle du segment d'échelle.

2. Pour construire en  $M_2$  le vecteur variation de vitesse  $(\Delta \vec{v})_{1 \rightarrow 2}$  :

- reporter le vecteur  $-\vec{v}_1$  à l'extrémité de  $\vec{v}_2$  ;
- construire le vecteur qui a pour origine celle de  $\vec{v}_2$  et pour extrémité celle de  $-\vec{v}_1$ .

3. Le vecteur variation de vitesse en  $M_2$   $(\Delta \vec{v})_{1 \rightarrow 2}$  est colinéaire et de même sens que la somme des forces  $\sum \vec{F}$  appliquées au ballon. Ainsi, la somme des forces appliquées au ballon est verticale, dirigée vers le bas.

### Flash test

1. B et C ; 2. C ; 3. A.

## Activité 1

### expérimentale Accélération d'un système

p. 9

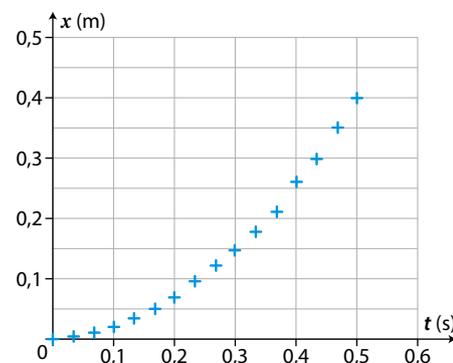
#### Capacité exigible

- Réaliser et exploiter une vidéo pour déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les représentations des vecteurs vitesse et accélération.

#### Pratique expérimentale

- On place sur un banc horizontal une voiture (ou un chariot) pouvant se déplacer sans frottement.
  - Le système {voiture} est relié à une ficelle horizontale, passant par une poulie, et à l'extrémité de laquelle est accrochée une masse. Le système est alors soumis à une force constante  $\vec{F}$  parallèle au banc.
  - On place un étalon de longueur à côté du banc horizontal.
  - On filme le mouvement du système initialement immobile.
  - On réalise le pointage image par image d'un point du système à l'aide d'un logiciel dédié.

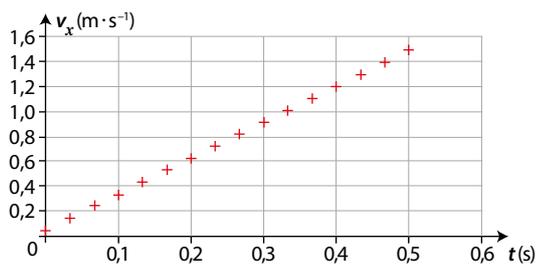
2 La récupération des données issues du pointage permet de tracer le graphique des variations de l'abscisse  $x$  du système en fonction du temps. On obtient une courbe similaire à celle du doc. B et reproduite ci-dessous :



On travaillera par la suite avec les données correspondant au doc. B.

3 Il est possible de créer la variable  $v_x = \frac{dx}{dt}$  à l'aide du logiciel tableur-grapheur.

On trace alors le graphique  $v_x = g(t)$  et on obtient une courbe similaire à celle du doc. C et reproduite ci-dessous :

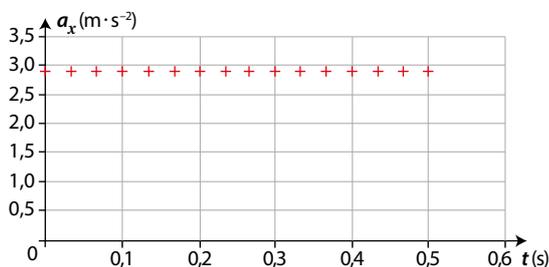


On note que  $v_x$  est une fonction linéaire (l'ordonnée à l'origine est quasiment nulle) du temps.

La modélisation graphique conduit à l'expression :  $v_x = 3,1 t$ .

Il est possible de créer la variable  $a_x = \frac{dv_x}{dt}$  à l'aide du logiciel tableur-grapheur.

On trace alors le graphique  $a_x = h(t)$  et on obtient une courbe similaire à celle du doc. C et reproduite ci-dessous :



On constate que la coordonnée  $a_x$  de l'accélération est constante de valeur  $2,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

4 En cycle urbain, une voiture passe de  $0$  à  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  en  $26 \text{ s}$ . En ligne droite, la valeur  $a$  de l'accélération supposée constante est définie comme la variation de la valeur de la vitesse par unité de temps.

$$\text{Soit } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} - 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{26 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

La valeur de l'accélération d'une voiture lors d'un test correspondant au cycle urbain est  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

### Un pas vers le cours

5 Le vecteur vitesse de  $M$  à la date  $t$  est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :  $\vec{v} = \frac{d\overline{OM}}{dt}$ .

Le vecteur accélération de  $M$  à la date  $t$  est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ .

### Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

Il est conseillé de faire réaliser la vidéo par les élèves puis d'exploiter cette vidéo. Toutefois, la vidéo du mouvement de la voiture est fournie si l'enseignant souhaite passer plus de temps sur le pointage et les différentes modélisations.

## Activité 2

### documentaire Vecteur accélération lors d'un mouvement circulaire ..... p. 10

#### Capacités exigibles

- Citer et exploiter les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire.
- Exploiter une vidéo ou une chronophotographie pour représenter des vecteurs vitesse et accélération.

#### Analyse des documents

1 En phase d'élan, la trajectoire du boulet est un cercle et les positions consécutives du point  $M$  repérées à intervalles de temps égaux sont espacées de la même distance. Le boulet est donc animé d'un mouvement circulaire uniforme.

2 Pour construire le vecteur accélération du boulet en  $M_2$ , il faut :

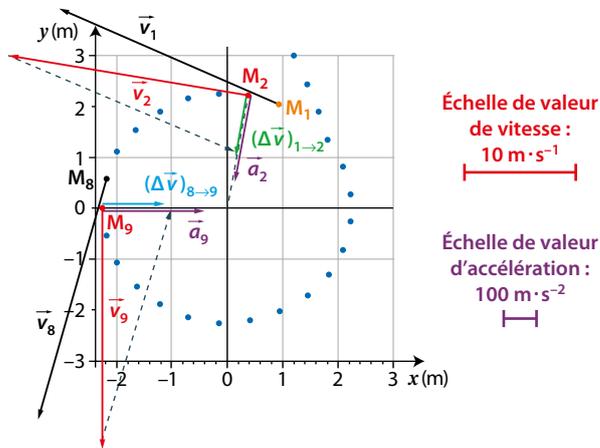
- construire le vecteur vitesse  $\vec{v}_1$  en  $M_1$  ;
- construire le vecteur vitesse  $\vec{v}_2$  en  $M_2$  ;
- construire le vecteur variation de vitesse  $(\Delta\vec{v})_{1 \rightarrow 2}$  en  $M_2$  ;
- construire le vecteur accélération  $\vec{a}_2$  en  $M_2$ .

Les mesures, calculs et constructions sur le schéma fourni conduisent aux résultats suivants :

Valeur de $\vec{v}_1$	Valeur de $\vec{v}_2$	Valeur de $(\Delta\vec{v})_{1 \rightarrow 2}$	Valeur de $\vec{a}_2$
$v_1 = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_2 = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta v_{1 \rightarrow 2} = 5,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$a_2 = 2,3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

On procède de la même manière pour construire le vecteur accélération du boulet en  $M_9$ . Les valeurs sont les mêmes car le mouvement du boulet est circulaire uniforme.

Valeur de $\vec{v}_8$	Valeur de $\vec{v}_9$	Valeur de $(\Delta\vec{v})_{8 \rightarrow 9}$	Valeur de $\vec{a}_9$
$v_8 = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_9 = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta v_{8 \rightarrow 9} = 5,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$a_9 = 2,3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$



3 On observe sur le schéma, aux erreurs expérimentales près, que la coordonnée tangentielle  $a_t$  du vecteur vitesse en  $M_2$  et en  $M_9$  est nulle. La coordonnée normale  $a_n$  a donc pour valeur  $2,3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Dans le repère de Frenet, le vecteur accélération s'écrit donc :

– en  $M_2$  :  $\vec{a}_2 = 2,3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \vec{u}_n + 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \vec{u}_t$  ;

– en  $M_9$  :  $\vec{a}_9 = 2,3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \vec{u}_n + 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \vec{u}_t$  .

**4** Littéralement, la coordonnée normale du vecteur accélération est égale à  $\frac{v^2}{R}$ . On relève graphiquement  $R = 2,2 \text{ m}$  et on a déterminé la valeur de la vitesse à la question 2. :  $v = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$\frac{v^2}{R} = \frac{(22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{2,2 \text{ m}} \text{ soit } \frac{v^2}{R} = 2,2 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Aux erreurs de mesures et de construction près,  $a_n = \frac{v^2}{R}$ .

Une toute petite variation dans les tracés graphiques entraîne une imprécision sur le résultat final qui donne la mesure de l'accélération.

**Un pas vers le cours**

**5** • Exploitation de la coordonnée tangentielle du vecteur accélération :  $a_t = \frac{dv}{dt}$ .

Si cette coordonnée est nulle, le mouvement est circulaire uniforme,  $v$  est constante.

• Exploitation de la coordonnée normale du vecteur accélération : la connaissance de l'accélération normale  $a_n$  et du rayon de la trajectoire circulaire  $R$  conduit à la valeur de la vitesse à la date  $t$  considérée par la relation  $a_n = \frac{v^2}{R}$ .

Inversement, la connaissance de la valeur de la vitesse  $v$  et du rayon de la trajectoire  $R$  conduit à la valeur  $a_n$  de l'accélération normale à la date  $t$  considérée.

**Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée**

Une toute petite variation dans les tracés graphiques entraîne une imprécision sur le résultat final donnant la valeur de l'accélération. Le plus grand soin devra être apporté aux différentes constructions.

Pour la construction des vecteurs, on pourra fournir aux élèves les vidéos « Tracé d'un vecteur variation de vitesse » et « Tracé d'un vecteur accélération » qui détaillent les différentes étapes.

**Capsule vidéo de cours : Tracé d'un vecteur accélération**

**QCM**

p. 15

**1. A ; 2. B ; 3. B et C ; 4. A et C ; 5. B ; 6. A ; 7. B et C ; 8. A et B ; 9. A et C.**

**Exercices**

**Appliquer le cours**

p. 18

**2 Déterminer les coordonnées d'un vecteur vitesse (1)**

$$\overline{OM} \begin{cases} x = -a \times t + b \\ y = 0 \end{cases}$$

Le vecteur vitesse de M à la date  $t$  est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :  $\vec{v} = \frac{d\overline{OM}}{dt}$ .

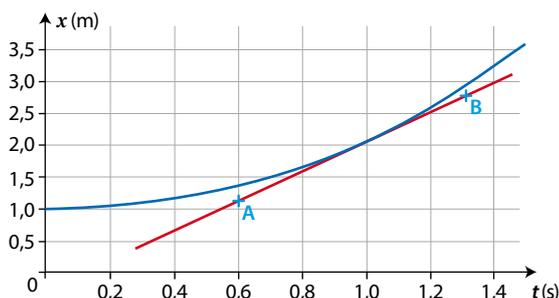
$$\text{Il vient } \vec{v} \begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = -a \\ v_y = \frac{dy}{dt} = 0 \end{cases}$$

**3 Déterminer les coordonnées d'un vecteur vitesse (2)**

**1.** En mathématiques, le nombre dérivé d'une fonction à une date donnée  $t$  correspond au coefficient directeur de la tangente à la courbe représentative de cette fonction à la date  $t$ .

**2.** Par définition  $v_x = \frac{dx}{dt}$ , c'est donc le nombre dérivé.

On détermine  $v_x$  en calculant le coefficient directeur de la tangente à la courbe représentative de la fonction  $x=f(t)$  à l'instant considéré.



Pour déterminer ce coefficient directeur, on relève les coordonnées de deux points A et B de la tangente à la courbe en  $t = 1,0 \text{ s}$  : A(0,6 s ; 1,1 m) et B(1,3 s ; 2,8 m) ;

$$\text{d'où } v_x = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A} = \frac{2,8 \text{ m} - 1,1 \text{ m}}{1,3 \text{ s} - 0,6 \text{ s}} = 2,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur du vecteur vitesse à la date  $t = 1,0 \text{ s}$  est donc  $v = \sqrt{v_x^2}$  soit  $v = 2,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**4 Déterminer les coordonnées d'un vecteur accélération (1)**

Le vecteur vitesse de B à la date  $t$  est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :  $\vec{v} = \frac{d\overline{OB}}{dt}$ .

$$\text{Il vient : } \vec{v} \begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ v_y = \frac{dy}{dt} = -4,9 \times 2t^1 + 4,0 = -9,8t + 4,0 \end{cases}$$

Le vecteur accélération de B à la date  $t$  est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps :  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ .

$$\text{Il vient } \vec{a} \begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} = -9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$$

**5 Déterminer les coordonnées d'un vecteur accélération (2)**

**1.** On détermine graphiquement les coordonnées du vecteur vitesse de la bille assimilée à un point matériel :

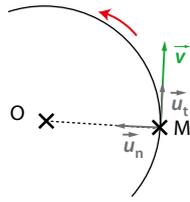
$$\vec{v} \begin{cases} v_x = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ v_y = -10t + 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$$

**2.** Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps :  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ .

$$\text{Il vient } \vec{a} \begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} = -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$$

## 6 Étudier un mouvement circulaire

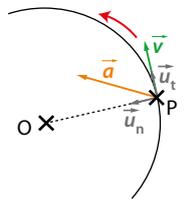
1. Le repère de Frenet est défini par :
- une origine mobile liée au point M étudié ;
  - un vecteur unitaire  $\vec{u}_n$  perpendiculaire en M à la trajectoire et orienté vers l'intérieur de la trajectoire ;
  - un vecteur unitaire  $\vec{u}_t$  tangent en M à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.



2. Dans le repère de Frenet défini en M, le vecteur accélération a pour expression :  $\vec{a} = \frac{v^2}{R} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t$ .

## 7 Exploiter la représentation d'un vecteur accélération

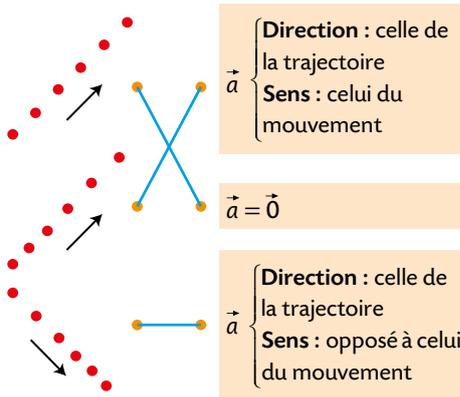
1. a. Le repère de Frenet est défini par :
- une origine mobile liée au point P ;
  - un vecteur unitaire  $\vec{u}_n$  perpendiculaire en P à la trajectoire et orienté vers l'intérieur de la trajectoire ;
  - un vecteur unitaire  $\vec{u}_t$  tangent en P à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.



- b. Dans le repère de Frenet défini en P, le vecteur accélération a pour expression :  $\vec{a} = \frac{v^2}{R} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t$ .

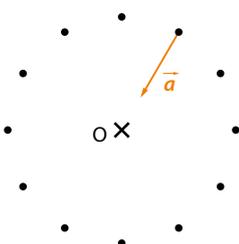
2. Le mouvement du point P est uniforme si  $\frac{dv}{dt} = 0$ . Cela est vérifié si la coordonnée du vecteur accélération suivant  $\vec{u}_t$  est nulle, l'accélération est alors suivant  $\vec{u}_n$ . Ici, le mouvement n'est pas uniforme car le vecteur accélération n'est pas « normal » à la trajectoire, c'est-à-dire il est non colinéaire à  $\vec{u}_n$ .

## 8 Exploiter les caractéristiques du vecteur accélération (1)



## 9 Exploiter les caractéristiques du vecteur accélération (2)

- Comme l'accélération tangentielle est nulle, le mouvement de P est circulaire uniforme. Le vecteur accélération  $\vec{a}$  est dirigé vers le centre de la trajectoire : l'accélération de P est centripète.



## 10 Tracer la trajectoire du centre de masse d'un système

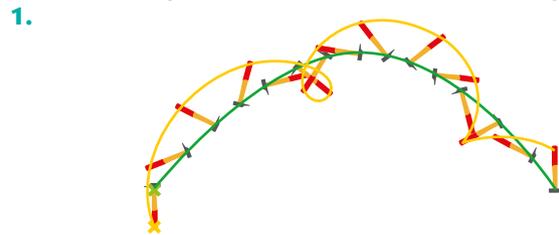
Le mobile est soumis à son poids  $\vec{P}$  et l'action de la table à coussins d'air  $\vec{R}$ . Comme les frottements sont négligés, ces deux forces se compensent :  $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ .

D'après la deuxième loi de Newton appliquée au mobile  $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}_G$  il vient donc  $m \vec{a}_G = \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ .

Il vient  $\vec{a} = \vec{0}$ , le vecteur vitesse du mobile est constant. Dans le référentiel galiléen considéré, le mouvement du centre de masse G du mobile est rectiligne uniforme.



## 11 Justifier la position du centre de masse d'un système



2. La trajectoire du centre de masse (en vert) semble parabolique. Elle est plus simple que celle du point jaune (en jaune). On peut donc supposer que le point vert est le centre de masse du marteau.
3. Le marteau n'est pas soumis à des forces qui se compensent car le mouvement de son centre de masse n'est pas rectiligne uniforme (on applique ici la contraposée du principe d'inertie).

## 12 Appliquer la deuxième loi de Newton (1)

1. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système {voiture} dans un référentiel terrestre supposé galiléen :  $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}_M$ .
2. Le système {voiture} est soumis à son poids  $\vec{P}$ , à la réaction de la route sur les pneus  $\vec{R}$  et à la force de frottement  $\vec{f}$ . Le poids et la réaction de la route sur les pneus se compensent :  $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ .

La deuxième loi de Newton appliquée au système se ramène donc à  $\vec{f} = m \vec{a}_M$  et donc  $\vec{a}_M = \frac{\vec{f}}{m}$ .

$$\vec{a}_M \begin{cases} \text{direction : celle de } \vec{f} \\ \text{sens : celui de } \vec{f} \text{ (opposé au sens du déplacement de la voiture)} \\ \text{valeur : } a_M = \frac{f}{m} = 0,333 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$$

## 13 Appliquer la deuxième loi de Newton (2)

1. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système {montgolfière} dans un référentiel terrestre supposé galiléen :  $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}_G$ .

Comme le mouvement est vertical uniformément accéléré, le vecteur accélération a même direction et même sens que celui du mouvement. Il est donc vertical vers le haut.

2. Le système {montgolfière} est soumis à son poids  $\vec{P}$  et à la poussée d'Archimède  $\vec{F}_p$ .

$$\Sigma \vec{F} = m \vec{a}_G \text{ s'écrit } \vec{P} + \vec{F}_p = m \times \vec{a}_G.$$

Par projection des vecteurs sur un axe vertical ascendant, on obtient  $-P + F_p = m \times a_G$ . On en déduit :

$$F_p = m \times a_G + P \text{ soit } F_p = m \times a_G + m \times g$$

c'est-à-dire  $F_p = m \times (a_G + g)$ .

Application numérique :

$$F_p = 1,20 \times 10^3 \text{ kg} \times (0,20 + 10) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

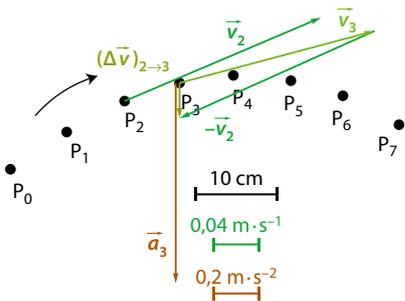
$$F_p = 1,2 \times 10^4 \text{ N.}$$

14 Le point sur les vecteurs

1. La valeur de la vitesse en  $P_2$  est donnée par  $v_2 = \frac{P_2P_3}{\Delta t}$ , et en  $P_3$  par  $v_3 = \frac{P_3P_4}{\Delta t}$ .

Graphiquement, on mesure  $P_2P_3 = 7,3 \text{ cm}$  et  $P_3P_4 = 6,8 \text{ cm}$ .  
Il vient donc  $v_2 = 0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $v_3 = 0,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

2. Pour construire en  $P_3$  le vecteur variation de vitesse  $(\Delta \vec{v})_{2 \rightarrow 3}$  :  
– reporter le vecteur  $-\vec{v}_2$  à l'extrémité de  $\vec{v}_3$  ;  
– construire le vecteur qui a pour origine  $\vec{v}_3$  et pour extrémité  $-\vec{v}_2$ .  
L'échelle de représentation des vecteurs vitesse est précisée sur la construction ci-dessous.



3. On mesure sur la figure en tenant compte de l'échelle  $(\Delta v)_{2 \rightarrow 3} = 0,034 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .  
La valeur du vecteur  $\vec{a}_3$  est donnée par  $a_3 = \frac{(\Delta v)_{2 \rightarrow 3}}{\Delta t}$ .

Application numérique :

$$a_3 = \frac{0,034 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{40 \times 10^{-3} \text{ s}} \text{ soit } a_3 = 0,85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

L'échelle de représentation du vecteur accélération est précisée sur la construction ci-dessus.

15 Ion acceleration

Traduction : Accélération d'un ion

Les faisceaux d'ions hautement énergétiques sont utilisés en physique des matériaux et en radiobiologie pour étudier l'influence de ce rayonnement sur la matière et la vie.

Un ion  $Al^{3+}$  pénètre dans un accélérateur linéaire qui maintient entre ses électrodes une tension  $U = 1\,000 \text{ V}$ .

La distance entre les électrodes est  $d = 20 \text{ cm}$ .

Il est soumis à une force électrostatique de valeur :  $F = \frac{|q| \times U}{d}$ .

- Calculer  $F$ .
- Vérifier que le poids de l'ion est négligeable devant la valeur  $F$ .
- Déterminer la valeur de l'accélération de l'ion.

Réponses

1. La valeur de la force électrostatique est :

$$F = \frac{3e \times U}{d} \text{ soit } F = \frac{3 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1\,000 \text{ V}}{20 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$F = 2,4 \times 10^{-15} \text{ N}$$

2. La valeur du poids est  $P = m \times g$ .

$$\text{Soit } P = 4,48 \times 10^{-26} \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$P = 4,39 \times 10^{-25} \text{ N}$$

$$\frac{F}{P} = \frac{2,4 \times 10^{-15} \text{ N}}{4,39 \times 10^{-25} \text{ N}} = 5,5 \times 10^9$$

$F \gg P$ , donc  $P$  est négligeable devant  $F$ .

3. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système {ion} dans un référentiel terrestre supposé galiléen,  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ .

Cela conduit à  $\vec{F} = m\vec{a}$  soit  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ .

La valeur de  $\vec{a}$  est donc  $a = \frac{F}{m}$ .

$$a = \frac{2,4 \times 10^{-15} \text{ N}}{4,48 \times 10^{-26} \text{ kg}} \text{ soit } a = 5,4 \times 10^{10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

16 Connaitre les critères de réussite

Virage d'un avion

1. Le virage s'opère selon une trajectoire circulaire parcourue à vitesse de valeur  $v$  constante.

On étudie le mouvement du centre de masse  $G$  de l'avion. Dans le repère de Frenet centré sur  $G$ , le vecteur accélération est :

$$\vec{a}_G = \frac{v^2}{R} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t$$

Comme la valeur de la vitesse de  $G$  est constante,  $\frac{dv}{dt} = 0$ .

Le vecteur accélération est donc :

$$\vec{a}_G = \frac{v^2}{R} \vec{u}_n ; \text{ il a pour valeur } a_G = \frac{v^2}{R}$$

$$a_G = \frac{\left(\frac{800 \times 10^3}{3\,600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}\right)^2}{10\,000 \text{ m}} \text{ soit } a_G = 4,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

2. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système {avion} dans un référentiel terrestre supposé galiléen,  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}_G$ . Avec l'expression de  $\vec{a}_G$  établie précédemment, on obtient

$$\Sigma \vec{F} = m \times \frac{v^2}{R} \vec{u}_n$$

Le vecteur  $\Sigma \vec{F}$  a donc pour valeur  $\Sigma F = m \times \frac{v^2}{R}$ .

$$\Sigma F = 50 \times 10^3 \text{ kg} \times \frac{\left(\frac{800 \times 10^3}{3\,600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}\right)^2}{10\,000 \text{ m}} \text{ soit } \Sigma F = 2,5 \times 10^5 \text{ N}$$

17 Saut au-dessus du canal de Corinthe

1. a. On projette sur l'axe  $(Ox)$  la position du centre de masse  $G$  du système étudié.



Les espaces parcourus horizontalement entre deux positions consécutives de  $G$  sont quasiment égaux.

Le mouvement de  $G$  suivant l'axe  $(Ox)$  est uniforme.

b. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système dans un référentiel terrestre supposé galiléen,  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}_G$ .

Si la seule force appliquée au système est le poids  $\vec{P}$ , il vient  $\vec{P} = m\vec{a}_G$ .  $\vec{P}$  et  $\vec{a}_G$  sont donc colinéaires et de même sens. Le vecteur accélération  $\vec{a}_G$  est donc vertical.

c. Si le vecteur accélération  $\vec{a}_G$  est vertical, sa coordonnée horizontale est nulle, et donc le mouvement horizontal s'effectue à vitesse de valeur constante : il est uniforme suivant l'axe  $(Ox)$ . Les réponses aux questions a. et b. sont donc cohérentes entre elles.

2. a. La coordonnée verticale de la vitesse  $v_y$  est une fonction affine du temps, de la forme :  $v_y(t) = a \times t + b$ .

La coordonnée verticale  $a_y = \frac{dv_y}{dt}$  s'identifie au coefficient directeur de la droite, soit, graphiquement, de l'ordre de  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  ; ainsi,  $a_y = g = \text{constante}$ . Le mouvement vertical de  $G$  est uniformément accéléré.

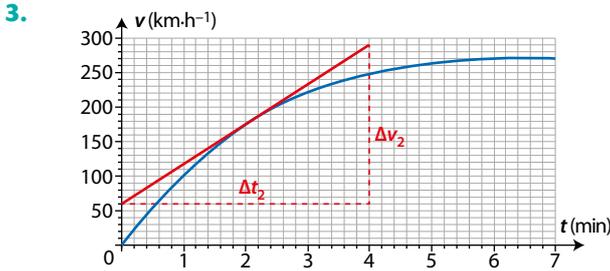
b. Lorsque la valeur de la vitesse verticale est nulle ( $v_y = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), la seule coordonnée de la vitesse qui demeure est  $v_x$ . Le vecteur vitesse  $\vec{v}$  est horizontal ; il est tangent à la trajectoire à l'instant considéré qui est par conséquent le sommet de la parabole. On a alors :

$$v = \sqrt{(v_x)^2} = |v_x| \text{ soit } v = v_0 \times \cos \alpha ;$$

$$v = 125 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \times \cos(33^\circ) = 105 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

### 18 Accélération d'un TGV

- Pour déterminer graphiquement la valeur  $a_G$  de l'accélération, il faut déterminer les coefficients directeurs des tangentes à la courbe aux dates considérées.
- Le coefficient directeur de la tangente à la courbe diminue au cours du temps ; la valeur de l'accélération diminue au cours du temps.



À chaque instant, le coefficient directeur de la tangente à la droite est donné par le rapport  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ .

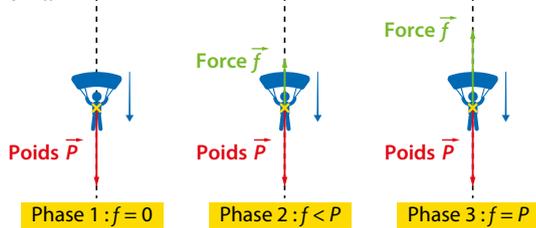
$$\text{À } t_2 = 2 \text{ min, } a_2 = \frac{\Delta v_2}{\Delta t_2} \text{ soit } a_2 = \frac{230 \times 10^3}{240 \text{ s}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$a_2 = 2,66 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

- À la date  $t = 2$  min, le vecteur accélération a pour caractéristiques :
- direction : la droite (voir la photographie) suivant laquelle se déplace la rame ;
  - sens : le même que celui de  $\vec{v}$  car le mouvement de la rame est accéléré.
  - valeur :  $a_2 = 2,66 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

### 19 Accélération d'un parachutiste

- Analyse des différentes phases :  
Dans un référentiel terrestre supposé galiléen, le système {parachutiste} est soumis à la somme des forces exercées par l'air  $\vec{f}$  et son poids  $\vec{P}$  de valeur  $P = m \times g$  soit 800 N. Ainsi, pour chaque phase, on a :



- D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système dans un référentiel terrestre supposé galiléen,  $\sum \vec{F} = m\vec{a}_G$ .

- **Phase 1** : Seul le poids agit sur le système donc :  
 $\vec{P} = m\vec{a}_G$  ou  $m\vec{g} = m\vec{a}_G$  soit  $\vec{a}_G = \vec{g}$  et donc  $a_G = g$ .  
Le vecteur accélération  $\vec{a}_G$  du centre de masse est vertical, dirigé vers le bas, de valeur  $a_G = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .  
C'est un mouvement de chute libre.

- **Phase 2** :  $\vec{P} + \vec{f} = m\vec{a}_G$  ou  $m\vec{g} + \vec{f} = m\vec{a}_G$  soit  $\vec{a}_G = \vec{g} + \frac{\vec{f}}{m}$ .  
La valeur de  $\vec{a}_G$  est obtenue en projetant les vecteurs sur l'axe (Oy) vertical descendant :  $a_G = g - \frac{f}{m}$ .

$$a_G = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} - \frac{300 \text{ N}}{80 \text{ kg}} \text{ . Soit } a_G = 6,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ .}$$

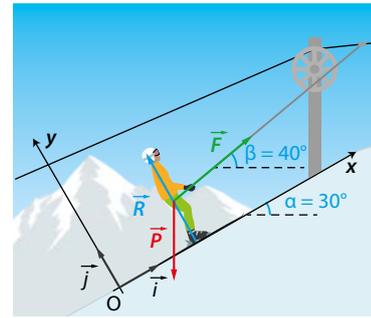
- Le vecteur accélération  $\vec{a}_G$  du centre de masse est vertical, dirigé vers le bas, de valeur  $a_G = 6,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

- **Phase 3** :  $\vec{P} + \vec{f} = m\vec{a}_G$  or  $\vec{f}$  et  $\vec{P}$  se compensent, donc  $\vec{0} = m\vec{a}_G$ .  
 $\vec{a}_G = \vec{0}$  et  $a_G = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  : la chute s'opère à vitesse de valeur constante.

- En conclusion, le mouvement de G est :
- rectiligne uniformément accéléré sur la phase 1 ;
  - rectiligne uniformément accéléré sur la phase 2 mais avec une valeur de l'accélération plus faible que sur la phase 1 ;
  - rectiligne uniforme sur la phase 3.

### 20 Le téléski

- Les forces agissant sur le système {skieuse} sont :
  - son poids  $\vec{P}$  ;
  - la réaction normale du support  $\vec{R}$  ;
  - la force de traction  $\vec{F}$  exercée par la perche.



$$2. \vec{P} \begin{cases} P_x = -m \times g \times \sin \alpha \\ P_y = -m \times g \times \cos \alpha \end{cases} ;$$

$$\vec{R} \begin{cases} R_x = 0 \\ R_y = R \end{cases} ;$$

$$\vec{F} \begin{cases} F_x = F \times \cos(\beta - \alpha) \\ F_y = F \times \sin(\beta - \alpha) \end{cases} .$$

- D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système dans un référentiel terrestre supposé galiléen,  $\sum \vec{F} = m\vec{a}_G$ .

En supposant la trajectoire du skieur rectiligne, le mouvement de son centre de masse est rectiligne uniforme,  $\vec{a}_G = \vec{0}$ .

La deuxième loi conduit donc à  $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0}$ .

Par projection sur chacun des axes du repère (O ;  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ) :

$$\begin{aligned} P_x + R_x + F_x &= 0 \text{ et } P_y + R_y + F_y = 0 . \\ \text{Il vient :} \\ m \times g \times \sin \alpha + 0 + F \times \cos(\beta - \alpha) &= 0 \\ -m \times g \times \cos \alpha + R + F \times \sin(\beta - \alpha) &= 0 . \end{aligned}$$

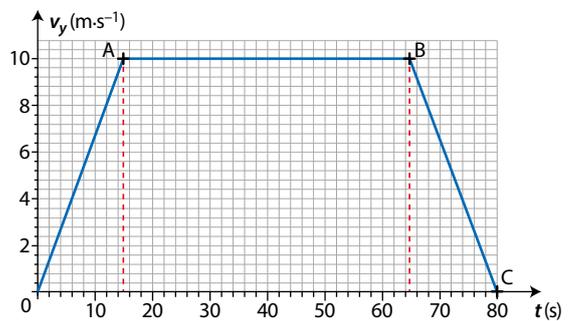
De la première égalité, on peut écrire :

$$F = \frac{m \times g \times \sin \alpha}{\cos(\beta - \alpha)}$$

$$\text{donc } F = \frac{60 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times \sin(30^\circ)}{\cos(10^\circ)}$$

$$\text{soit } F = 3,0 \times 10^2 \text{ N} .$$

### 21 La cabine d'ascenseur



- Pour chacune des phases, le vecteur accélération correspond au coefficient directeur de la tangente à la courbe  $v_y = f(t)$ .

- **Première phase**, pour  $t$  allant de 0 s à 15 s :

$$a_y = \frac{v_A - 0}{t_A - 0} \text{ soit } a_y = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} - 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{15 \text{ s} - 0 \text{ s}} ; a_y = 0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} .$$

- **Deuxième phase**, pour  $t$  allant de 15 s à 65 s :  $a_y = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

- **Troisième phase**, pour  $t$  allant de 65 s à 80 s :

$$a_y = \frac{v_C - v_B}{t_C - t_B} \text{ soit } a_y = \frac{0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} - 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{80 \text{ m} - 65 \text{ m}} ; a_y = -0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} .$$

**2. a.** La personne debout dans l'ascenseur est soumise à deux forces :

- $\vec{R}$ , l'action du support (plancher de la cabine) ;
- $\vec{P}$ , le poids de la personne.

Ces forces ont même direction mais sont de sens opposés.

**b.** On projette les vecteurs force sur un axe vertical ascendant.

• **Première phase :**

$$R - P = m \times a_y \text{ donc } R = m \times (g + a_y)$$

$$R = 70 \text{ kg} \times (9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} + 0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$$

$$\text{soit } R = 7,3 \times 10^2 \text{ N.}$$

• **Deuxième phase :**

$$R - P = 0 \text{ donc } R = P = m \times g$$

$$R = 70 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ soit } R = 6,9 \times 10^2 \text{ N.}$$

• **Troisième phase :**

$$R - P = m \times a_y \text{ donc } R = m \times (g + a_y)$$

$$R = 70 \text{ kg} \times (9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} - 0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$$

$$\text{soit } R = 6,4 \times 10^2 \text{ N.}$$

**c. • Première phase :**

La personne reste en équilibre relatif par rapport à la cabine. Si elle était sur un pèse-personne, l'action de ses pieds sur la « balance » serait égale et opposée à l'action de ce support sur ses pieds qui représente l'action  $\vec{R}$  du support (troisième loi de Newton relative aux interactions).

Comme  $R > P$ , le pèse-personne indiquerait un poids apparent  $P_{\text{app}} = R > P$  ! La personne a l'impression que son « poids » a augmenté ! On ressent comme un « écrasement ».

• **Deuxième phase :**

Rien ne différencie cette phase d'un repos. Pas de modification de perception ressentie.

• **Troisième phase :**

On obtient dans cette situation  $P_{\text{app}} = R < P$  : la personne a l'impression que son poids a diminué. Elle semble être soulevée.

## 22 Côté maths

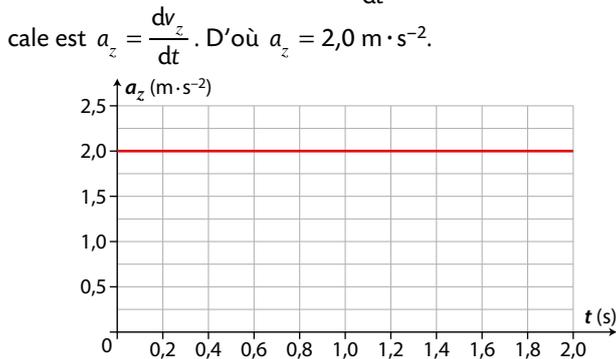
### Dériver une fonction

**1.** Le vecteur vitesse de D à la date  $t$  est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OD}}{dt} \text{ et a pour coordonnée verticale } v_z = \frac{dz}{dt}$$

$$\text{D'où } v_z = 1,0 \times 2t = 2,0 \times t.$$

**2.** Le vecteur accélération de D à la date  $t$  est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$  et a pour coordonnée verticale est  $a_z = \frac{dv_z}{dt}$ . D'où  $a_z = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .



Le vecteur accélération de D a pour direction et sens ceux du mouvement rectiligne, pour valeur  $a = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

## 23 À chacun son rythme

### Vol d'une balle de golf

**1.** Le mouvement de la balle semble être rectiligne et uniforme sur cette première partie de sa trajectoire.

$$\text{On en déduit que } v_0 = \frac{M_1 M_8}{7 \Delta t}$$

Avec l'échelle indiquée sur la figure, on détermine :

$$v_0 = \frac{0,53 \text{ m}}{7,0 \times 10^{-3} \text{ s}} = 76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La balle a une vitesse initiale de valeur égale à  $76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**2.** Deux forces agissent sur la balle :

- le poids  $\vec{P}$  (force verticale orientée vers le bas) ;
- une force aérodynamique  $\vec{F}$  liée à l'effet « backspin » (force verticale orientée vers le haut).

**3.** D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système {balle} dans un référentiel terrestre supposé galiléen,

$$\Sigma \vec{F} = m \vec{a} \text{ soit } \vec{P} + \vec{F} = m \vec{a}.$$

Les forces appliquées étant verticales  $a_x = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Par projection des vecteurs sur un axe vertical descendant, on obtient  $P - F = m \times a_y$ .

$$\text{On a alors } a_y = \frac{m \times g - F}{m} \text{ ou } a_y = g - \frac{F}{m} ;$$

$$a_y = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} - \frac{5,0 \times 10^{-2} \text{ N}}{46 \times 10^{-3} \text{ kg}}$$

$$a_y = 8,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}. \text{ Or } a = \sqrt{(a_y)^2} = |a_y| \text{ soit } a = 8,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

**4.** La balle touche le sol à la distance  $D = \frac{v_0^2 \times \sin^2 \theta}{a}$ .

$$D = \frac{(76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \times \sin^2(2 \times 11^\circ)}{8,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} \text{ soit } D = 2,5 \times 10^2 \text{ m.}$$

La distance  $D$  est bien voisine des 250 mètres annoncés dans le texte introductif.

**Remarque :** on peut noter que  $F$  a pour valeur  $5,0 \times 10^{-2} \text{ N}$  alors que  $P = m \times g$  vaut environ  $45 \times 10^{-2} \text{ N}$ .

La somme vectorielle des forces n'est pas nulle : le mouvement est accéléré, la trajectoire est alors parabolique mais la vitesse initiale est tellement grande que la toute première partie de la trajectoire est « tendue ». L'arc est alors assimilable à une droite qui est parcouru à vitesse de valeur quasi constante (elle décroît cependant tout au long de l'ascension de la balle).

## 24 Python

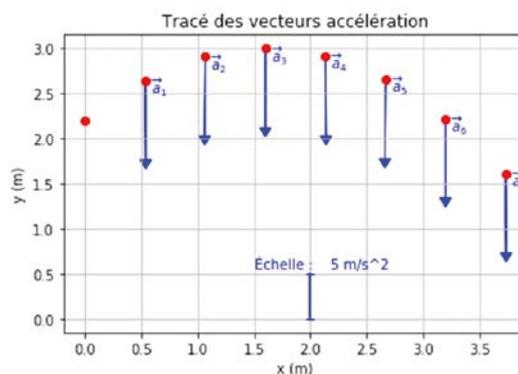
### Vecteur accélération

**1.** Lignes de code pour calculer les valeurs de  $a_x$  et  $a_y$

Ligne 47 :  $a_x = a_x + [(v_x[i+1] - v_x[i]) / (t[i+1] - t[i])]$

Ligne 51 :  $a_y = a_y + [(v_y[i+1] - v_y[i]) / (t[i+1] - t[i])]$

**2.** À l'exécution du programme, on obtient le tracé ci-dessous :



**3.** Le vecteur accélération  $\vec{a}$  du centre de masse du ballon a pour caractéristiques :

- direction : verticale ;
- sens : vers le bas ;
- valeur :  $a = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

**4.** Le vecteur champ de pesanteur terrestre  $\vec{g}$  a les mêmes caractéristiques que le vecteur  $\vec{a}$  ci-dessus.

**5.** D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système dans un référentiel terrestre supposé galiléen,  $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}$ .

$$\text{Or } \vec{a} = \vec{g}, \text{ donc } m \vec{a} = m \vec{g} \text{ soit } m \vec{a} = \vec{P}.$$

La deuxième loi de Newton conduit à  $\Sigma \vec{F} = \vec{P}$ .

Le ballon n'est soumis qu'à son poids ; le modèle de la chute libre est approprié.

Préparation à l'écrit

25 **Le thermomètre de Galilée**

Partie I

1. Schéma des forces qui s'exercent sur l'ampoule en mouvement :



2. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système dans un référentiel terrestre supposé galiléen,  $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}_G$ . Il vient  $\vec{P} + \vec{f} + \vec{F}_p = m \times \vec{a}_G$ .

On projette ces vecteurs sur l'axe vertical orienté vers le bas :

$$P - f - F_p = m \times a_G.$$

$$D'où \quad m \times g - k \times v_G - \rho_\ell \times V \times g = m \times a_G.$$

Comme  $V = \frac{4}{3} \pi \times R^3$ , il vient :

$$m \times g - k \times v_G - \rho_\ell \times \frac{4}{3} \pi \times R^3 \times g = m \times a_G.$$

Par simplification, on obtient :

$$a_G = g \times \left( 1 - \frac{4\rho_\ell \times \pi \times R^3}{3m} \right) - \frac{k}{m} v_G.$$

On identifie cette relation avec celle  $a_G = A - B \times v_G$  de l'énoncé :

$$A = g \times \left( 1 - \frac{4\rho_\ell \times \pi \times R^3}{3m} \right) \text{ et } B = \frac{k}{m}.$$

3. Applications numériques :

$$A = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times \left( 1 - \frac{4 \times 848 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times \pi \times (1,50 \times 10^{-2} \text{ m})^3}{3 \times 12,0 \times 10^{-3} \text{ kg}} \right)$$

$$A = 9,55 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2};$$

$$B = \frac{8,8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}{12,0 \times 10^{-3} \text{ kg}}.$$

$$B = 0,73 \text{ s}^{-1}.$$

Remarque : l'accélération étant verticale, dirigée vers le bas, on peut confondre  $a_y$  et  $a_G$ .

Partie II

La représentation graphique de la valeur de la vitesse montre qu'il y a une asymptote horizontale donc l'existence d'une vitesse limite. On relève comme valeur asymptotique  $v_\ell = 13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Complément

Physiquement, ce profil traduit le fait que l'accélération décroît puis devient nulle : les forces de frottement fluide augmentent avec la valeur de la vitesse jusqu'à ce que, cumulée avec la poussée d'Archimède, il y ait compensation exacte du poids. La somme des forces est alors nulle et le mouvement devient rectiligne et uniforme.

2. On a obtenu comme expression de la valeur de l'accélération :  $a_G = A - B \times v_G$ .

Le vecteur accélération de G à la date t est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps :  $\vec{a}_G = \frac{d\vec{v}_G}{dt}$ .

Quand la vitesse limite est atteinte,  $\vec{v}_G = \vec{cste}$

et donc  $\vec{a}_G = \frac{d\vec{v}_G}{dt} = \vec{0}$ .

On obtient donc  $a_G = A - B \times v_\ell = 0$  soit  $v_\ell = \frac{A}{B}$ .

$v_\ell = \frac{9,55 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{0,73 \text{ s}^{-1}}$  soit  $v_\ell = 13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , ce qui est en accord avec les mesures de la question 1.

26 **Un ascenseur à bateaux**

Partie I

1. Dans le référentiel terrestre lié au sol, le mouvement de G est circulaire uniforme : la trajectoire est circulaire de centre C ; la valeur de la vitesse est constante mais sa direction change à tout instant.

2. Dans un repère de Frenet défini en G, le vecteur accélération a pour expression :

$$\vec{a}_G = \frac{v^2}{R} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t.$$

Comme le mouvement de G est uniforme,  $\frac{dv}{dt} = 0$ , le vecteur accélération est « centripète » c'est-à-dire qu'il est colinéaire et de même sens que  $\vec{u}_n$ .

Partie II

La valeur de l'accélération de G se ramène à celle de l'accélération normale :  $a_G = \frac{v^2}{R}$ .

Le pointage permet de déterminer la valeur de la vitesse.

On relève, entre deux positions consécutives de G et avec l'échelle indiquée : 3,6 m.

$$\text{Et donc } v = \frac{G_i G_{i+1}}{\Delta t} \text{ soit } v = 0,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

On relève sur le schéma de l'ascenseur un rayon  $R = 12 \text{ m}$ .

$$\text{On en déduit } a_G = \frac{(0,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{12 \text{ m}} \text{ soit } a_G = 1,2 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

La valeur calculée de  $a_G$  est nettement inférieure au centième de g : le roulis est négligeable.

27 **Retransmission par caméra mobile**

1. Lors de la phase 1, la valeur de la vitesse du X-track est une fonction linéaire du temps ;  $v = A \times t$ . La valeur de l'accélération est donc constante. De plus, le X-track se déplace sur des rails parallèles à la piste ; sa trajectoire est donc rectiligne. Le mouvement du X-track est rectiligne uniformément accéléré.

Lors de la phase 2, la valeur de la vitesse du X-track est constante ;  $v = B$ . Son mouvement est donc rectiligne uniforme.

2. a. La valeur v de la vitesse du X-track s'exprime par :  $v = \frac{dx_{\text{X-track}}}{dt}$ .

Lors de la phase 1 et avec des unités SI :

$$v = \frac{d(1,92t^2 + 5)}{dt} = 3,84t.$$

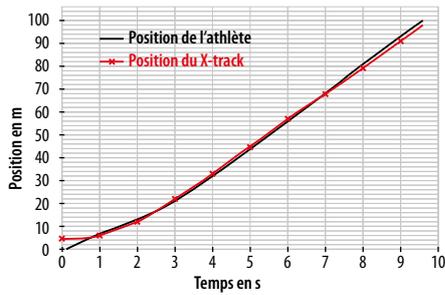
La valeur v de la vitesse du X-track est bien une fonction linéaire du temps. Le calcul du coefficient directeur du segment de droite de la phase 1 donne une valeur de  $3,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Lors de la phase 2 et avec des unités SI :

$$v = \frac{d(11,5(t-3) + 22,2)}{dt} = 11,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur de la vitesse du X-track est bien constante, égale à  $11,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**b.** La courbe rouge, ci-dessous, indique la position du X-track en fonction du temps.



**3. a.** Graphiquement, et d'après la courbe tracée à la question précédente, c'est l'athlète qui passe la ligne d'arrivée en premier puisque la courbe rouge est en-dessous de la noire.

Par le calcul, à  $t = 9,58$  s,

$$x_{\text{X-track}} = 11,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (9,58 \text{ s} - 3 \text{ s}) + 22,2 \text{ m} \\ = 98 \text{ m}.$$

Cette abscisse confirme que le X-track n'a pas encore passé la ligne d'arrivée lorsque l'athlète termine sa course.

**b.** Le X-track a  $100 \text{ m} - 98 \text{ m} = 2 \text{ m}$  de retard quand l'athlète est sur la ligne d'arrivée.

# 2

## Mouvement dans un champ uniforme

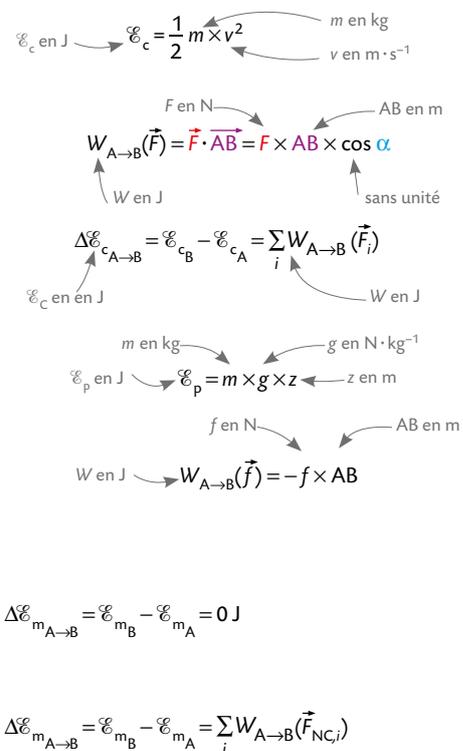
### Programme officiel

#### Mouvement et interactions

2. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<p><b>Mouvement dans un champ uniforme</b> Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme. Champ électrique créé par un condensateur plan. Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</p> <p>Aspects énergétiques.</p>	<p>Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan. Établir et exploiter les équations horaires du mouvement. Établir l'équation de la trajectoire. Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan, son expression étant donnée.</p> <p>Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme. <i>Utiliser des capteurs ou une vidéo pour déterminer les équations horaires du mouvement du centre de masse d'un système dans un champ uniforme. Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique.</i></p> <p><b>Capacité numérique :</b> Représenter, à partir de données expérimentales variées, l'évolution des grandeurs énergétiques d'un système en mouvement dans un champ uniforme à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur.</p> <p><b>Capacités mathématiques :</b> Résoudre une équation différentielle, déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.</p>

### Liens avec les programmes officiels de première (enseignement de spécialité et enseignement scientifique)

Vocabulaire associé	Connaissances et savoir-faire	Modèles / Relations
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Référentiel</li> <li>• Vecteur déplacement d'un point.</li> <li>• Vecteur vitesse.</li> <li>• Variation du vecteur vitesse.</li> <li>• Force de gravitation et champ de gravitation.</li> <li>• Poids.</li> <li>• Cas de la chute libre à une dimension.</li> <li>• Force électrostatique et champ électrostatique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choisir un référentiel pour décrire le mouvement d'un système.</li> <li>• Définir le vecteur vitesse d'un point ; le représenter.</li> <li>• Définir le vecteur variation de vitesse d'un point ; le représenter.</li> <li>• Caractériser différents mouvements.</li> <li>• Utiliser les expressions vectorielles de la force de gravitation et du champ de gravitation.</li> <li>• Utiliser l'expression vectorielle du poids d'un objet, approché par la force d'interaction gravitationnelle s'exerçant sur cet objet à la surface d'une planète.</li> <li>• Utiliser les expressions vectorielles de la force électrostatique et du champ électrostatique.</li> </ul>	$\vec{v} = \frac{MM'}{\Delta t}$ avec $\Delta t$ extrêmement courte  $\vec{F}_g = -G \times \frac{m_B \times m_A}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$  $\vec{P}_A = \vec{F}_{A/\text{objet}} = -G \times \frac{m_A \times m_{\text{objet}}}{R_A^2} \vec{u}_{A \rightarrow \text{objet}}$ <p style="text-align: center;"> <small>G en <math>N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}</math>      <math>m</math> en kg</small> </p> $\vec{G} = -G \times \frac{m_A}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ <p style="text-align: center;"> <small>Valeur en <math>N \cdot kg^{-1}</math>      <math>d</math> en m</small> </p> $\vec{F}_e = k \times \frac{q_B \times q_A}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ <p style="text-align: center;"> <small>k en <math>N \cdot m^2 \cdot C^{-2}</math>      q en C</small> </p> $\vec{E} = k \times \frac{q_A}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ <p style="text-align: center;"> <small>Valeur en <math>N \cdot C^{-1}</math> ou <math>V \cdot m^{-1}</math>      d en m</small> </p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Énergie cinétique.</li> <li>• Travail d'une force.</li> <li>• Théorème de l'énergie cinétique.</li> <li>• Énergie potentielle. Cas du champ de pesanteur terrestre.</li> <li>• Forces non-conservatives : exemple des frottements.</li> <li>• Énergie mécanique.</li> <li>• Conservation et non conservation de l'énergie mécanique.</li> <li>• Gain ou dissipation d'énergie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel.</li> <li>• Utiliser l'expression du travail <math>W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}</math> dans le cas de forces constantes.</li> <li>• Énoncer et exploiter le théorème de l'énergie cinétique.</li> <li>• Établir et utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur pour un système au voisinage de la surface de la Terre.</li> <li>• Calculer le travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne.</li> <li>• Identifier des situations de conservation et de non conservation de l'énergie mécanique.</li> <li>• Exploiter la conservation de l'énergie mécanique dans des cas simples : chute libre en l'absence de frottement, oscillations d'un pendule en l'absence de frottement, etc.</li> <li>• Utiliser la variation de l'énergie mécanique pour déterminer le travail des forces non conservatives.</li> </ul>	
--	--	---

### Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

Il pourra être utile de faire remarquer aux élèves que  $g$  peut s'exprimer indifféremment en  $N \cdot kg^{-1}$  ou en  $m \cdot s^{-2}$ .

**Vu en première**

## Champs, forces et théorème de l'énergie cinétique

p. 26

### Réactiver ses connaissances

#### Capsule vidéo : Théorème de l'énergie cinétique

Le théorème de l'énergie cinétique appliqué à la plongeuse modélisée par un point matériel permet d'écrire :

$\Delta E_{cA \rightarrow B} = E_{cB} - E_{cA} = W_{A \rightarrow B}(\vec{P})$  ; A est la position initiale de la plongeuse en haut du plongeur et B sa position finale lorsqu'elle touche l'eau.

Les altitudes  $z_A$  et  $z_B$  sont repérées sur un axe vertical orienté vers le haut.

$$\frac{1}{2} m \times v_B^2 - \frac{1}{2} m \times v_A^2 = m \times g \times (z_A - z_B).$$

La valeur  $v_A$  de la vitesse de la plongeuse en haut du plongeur est nulle.

Il vient  $\frac{1}{2} m \times v_B^2 = m \times g \times (z_A - z_B)$ .

D'où  $v_B = \sqrt{2g \times (z_A - z_B)}$ .

$z_A - z_B = 5,0$  m, alors  $v_B = \sqrt{2 \times 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 5,0 \text{ m}}$

soit  $v_B = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Flash test

**1. B ; 2. A ; 3. C.**

## Activité 1

### Expérimentale Mouvement dans un champ de pesanteur

p. 27

#### Capacités exigibles

- Établir et exploiter les équations horaires du mouvement.
- Établir l'équation de la trajectoire.
- Utiliser des capteurs ou une vidéo pour déterminer les équations horaires du mouvement du centre de masse d'un système dans un champ uniforme.
- Capacités mathématiques : Déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.
- Collecter des données sur un mouvement (vidéo, chronophotographie, etc.).

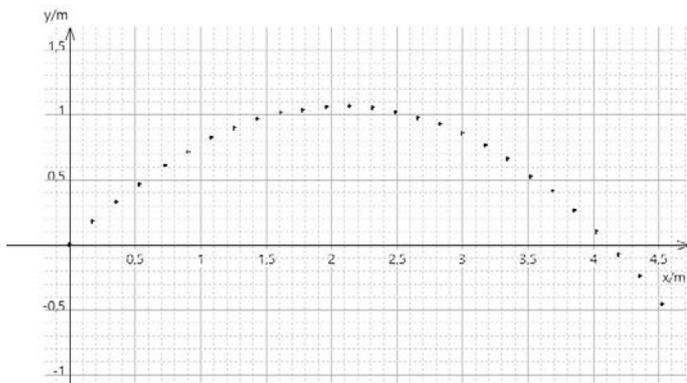
#### Pratique expérimentale

**1 a.** À l'aide d'un logiciel de pointage vidéo, après avoir défini l'origine du repère et indiqué un étalon de distance, on pointe la position du centre de masse du projectile.

Si besoin, on calcule les coordonnées des vecteurs vitesse  $\vec{v}$  et accélération  $\vec{a}$  à l'aide des fonctionnalités du logiciel tableur-grapheur utilisé.

**Exemple de résultats du pointage obtenu avec une vidéo d'un lancer d'un projectile :**

**Ressource pour le professeur à télécharger : Vidéo d'un lancer d'une boule de pétanque**



**b.** Pour déterminer la vitesse à l'instant initial et l'angle  $\alpha$  du lancer, on utilise les coordonnées du vecteur vitesse à l'instant initial issues du pointage vidéo.

• La valeur de la vitesse à l'instant initial a pour expression

$$v_0 = \sqrt{v_{x_0}^2 + v_{y_0}^2} . \text{ Avec le pointage réalisé, on trouve :}$$

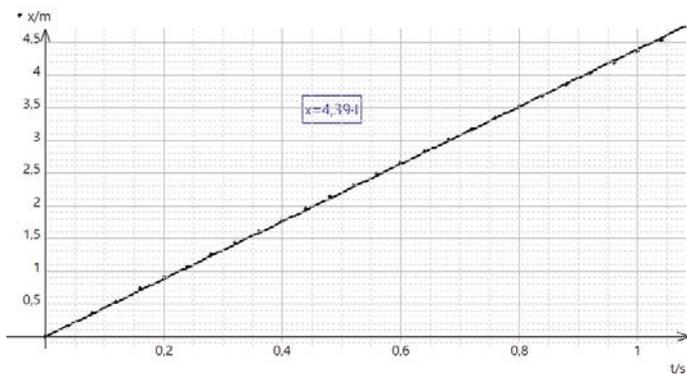
$$v_0 = \sqrt{(4,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 + (4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2} \text{ soit } v_0 = 6,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} .$$

• Pour déterminer l'angle  $\alpha$  du lancer, on détermine :

$$\tan \alpha = \frac{v_{y_0}}{v_{x_0}} \text{ d'où } \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{v_{y_0}}{v_{x_0}} \right) . \text{ Avec le pointage réalisé, on}$$

$$\text{trouve } \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{4,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \right) , \text{ soit } \alpha = 44^\circ .$$

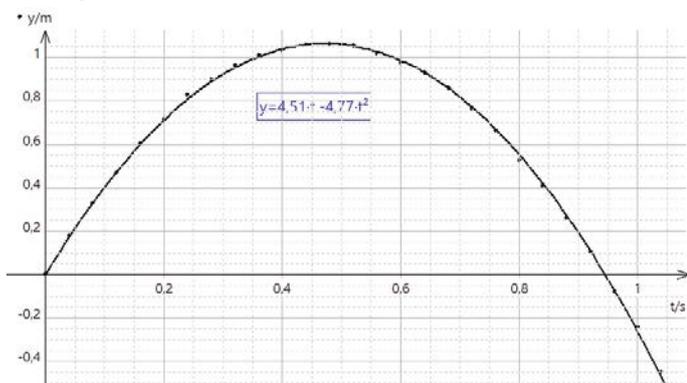
**c.** On constate que la coordonnée  $x=f(t)$  du point M suivant l'axe des abscisses est une fonction linéaire du temps. Le graphique obtenu à partir du pointage réalisé est le suivant :



Or, on a dans le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE :

$x = v_0 \times \cos \alpha \times t$  où  $v_0$  et  $\alpha$  sont des constantes, donc  $x = f(t)$  est bien une fonction linéaire du temps.

De même, la coordonnée  $y = f(t)$  du point M suivant l'axe des ordonnées est une fonction polynôme de degré 2. À partir du pointage réalisé, on obtient :



Or, on a dans le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE :

$$y = -\frac{1}{2} g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t \text{ où } g, v_0 \text{ et } \alpha \text{ sont des constantes,}$$

donc  $y = f(t)$  est une fonction polynôme de degré deux.

**2** On extrait  $t$  de l'expression  $x = v_0 \times \cos \alpha \times t$ , soit :

$$t = \frac{x}{v_0 \times \cos \alpha} .$$

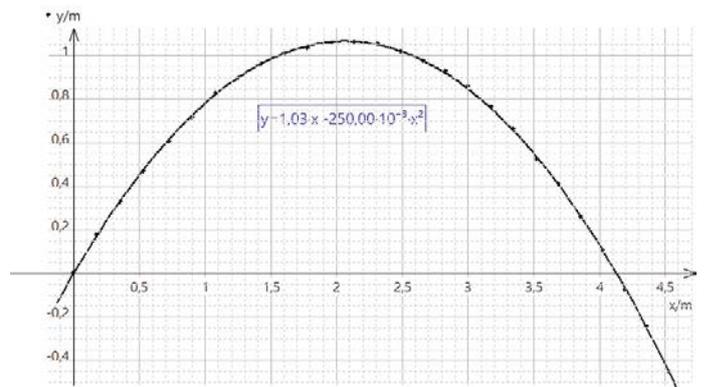
On remplace  $t$  dans l'expression  $y = -\frac{1}{2} g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t$ .

$$\text{Il vient } y = -\frac{1}{2} g \times \left( \frac{x}{v_0 \times \cos \alpha} \right)^2 + v_0 \times \sin \alpha \times \frac{x}{v_0 \times \cos \alpha} .$$

L'équation de la trajectoire du système est donc :

$$y = -\frac{g}{2(v_0 \times \cos \alpha)^2} x^2 + \tan \alpha \times x .$$

Avec le pointage réalisé, on obtient :



**3** L'origine du repère est placée à la position initiale de la boule, c'est-à-dire à +1,1 m du sol.

La boule de pétanque touche donc le sol lorsque sa coordonnée verticale,  $y$  est  $y_{\text{sol}} = -1,1$  m.

Il faut donc résoudre l'équation :

$$y_{\text{sol}} = -\frac{g}{2(v_0 \times \cos \alpha)^2} x^2 + \tan \alpha \times x ;$$

$$\text{soit } -\frac{g}{2(v_0 \times \cos \alpha)^2} x^2 + \tan \alpha \times x - y_{\text{sol}} = 0 .$$

Avec  $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $v_0 = 7,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\alpha = 51^\circ$ , cette équation du deuxième degré admet les deux solutions :  $x_1 = +6,7$  m et  $x_2 = -0,79$  m.

La solution négative n'a pas de sens physique.

La seule solution, physiquement acceptable, est donc  $x = +6,7$  m.

La boule tombe au-delà du cochonnet, le joueur n'a pas réussi son lancer.

**Un pas vers le cours**

**4** On établit l'équation de la trajectoire d'un projectile dans un champ de pesanteur uniforme à partir des équations horaires  $x = f(t)$  et  $y = f(t)$  du projectile.

Pour cela, on exprime  $t$  en fonction de  $x$  dans l'équation horaire  $x = f(t)$ . On remplace ensuite  $t$  par son expression en fonction de  $x$  dans l'équation horaire  $y = f(t)$ .

On exploite l'équation de la trajectoire en calculant l'abscisse  $x$  du projectile connaissant son ordonnée, ou inversement.

## Activité 2

### numérique Évolution des énergies d'un système en mouvement dans un champ de pesanteur

p. 28

#### Capacités exigibles

- Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme.
- Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique.
- **Capacité numérique** : Représenter, à partir de données expérimentales variées, l'évolution des grandeurs énergétiques d'un système en mouvement dans un champ uniforme à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur.
- Mettre en œuvre un protocole permettant d'estimer une énergie transférée mécaniquement.

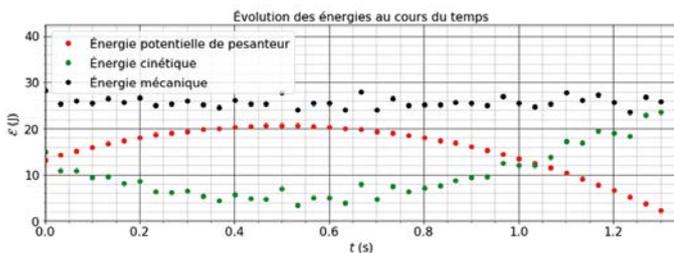
#### Simulation numérique

##### Ressources pour le professeur à télécharger :

- Fichier Python
- Explications du programme en langage Python

1  $E_c = E_c + [0.5 * m * V[j]**2]$

2 a. L'exécution du programme conduit aux courbes suivantes :



b. L'énergie potentielle  $\mathcal{E}_p$  de la boule de pétanque (courbe rouge) augmente au début de la trajectoire car la boule prend de l'altitude. Elle passe par un maximum, puis diminue pour s'annuler lorsque la boule touche le sol.

L'énergie cinétique  $\mathcal{E}_c$  (courbe verte) diminue lorsque la boule prend de l'altitude car le poids est alors une force résistante (travail négatif). Ensuite, elle passe par un minimum lorsque la boule atteint le sommet de sa trajectoire. Enfin, elle augmente lors de la descente, le poids est alors devenu moteur.

3 a. L'altitude maximale de la boule de pétanque est atteinte lorsque son énergie potentielle de pesanteur est maximale. Par lecture graphique,  $\mathcal{E}_{p_{\max}} = 21$  J. Or,  $\mathcal{E}_{p_{\max}} = m \times g \times z_{\max}$ .

Il vient  $z_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{p_{\max}}}{m \times g}$  soit  $z_{\max} = \frac{21 \text{ J}}{0,60 \text{ kg} \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}} = 3,6 \text{ m}$ .

La boule atteint une altitude maximale de 3,6 m.

b. Par lecture graphique, l'énergie cinétique de la boule de pétanque lorsqu'elle atteint le sol est 24 J.

$v_{\text{sol}} = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_{c_{\text{sol}}}}{m}}$  soit  $v_{\text{sol}} = \sqrt{\frac{2 \times 24 \text{ J}}{0,60 \text{ kg}}} = 8,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

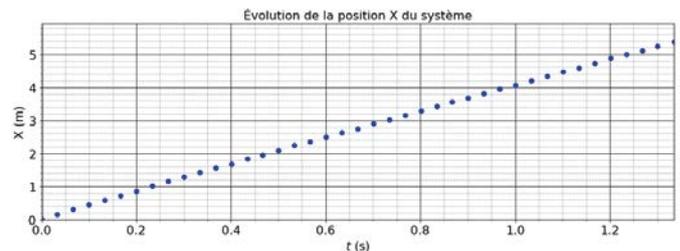
La valeur de la vitesse de la boule de pétanque lorsqu'elle touche le sol est  $8,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

4 La boule de pétanque est en chute libre si elle n'est soumise qu'à son poids. Le poids étant une force conservative, l'énergie mécanique de la boule se conserve.

C'est ce que l'on peut observer graphiquement (courbe noire) aux erreurs expérimentales près.

5 Comme l'énergie potentielle de pesanteur est nulle à  $t = 1,35$  s (graphique de la question 2.a), la boule de pétanque touche le sol à  $t = 1,35$  s.

On peut lire graphiquement la valeur de l'abscisse de la boule sur la courbe affichée suite à l'exécution du programme :



On détermine graphiquement une abscisse de 5,4 m. La boule ne peut donc pas percuter directement la boule adverse qui est située à 7,0 m du lanceur.

#### Un pas vers le cours

6 Lors d'un mouvement de chute libre d'un système dans un champ de pesanteur, il y a transfert total de l'énergie cinétique du système en énergie potentielle de pesanteur, et inversement.

## Activité 3

### documentaire Accélération de particules chargées

p. 29

#### Capacités exigibles

- Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan, son expression étant donnée.

- Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme.

## Analyse des documents

**1 a.** Les électrons, sur le doc. **A**, se déplacent verticalement vers le bas ; la force électrique  $\vec{F}$  à laquelle ils sont soumis est donc verticale vers le bas.

Comme  $\vec{F} = -e\vec{E}$  avec  $-e < 0$ , il vient que le champ électrique est colinéaire et de sens opposé à la force électrique. Le champ électrique est donc horizontal orienté vers le haut.

**b.** La charge de l'armature A est négative, et celle de l'armature B positive, car le champ électrique  $\vec{E}$  est orienté dans le sens des potentiels décroissants (d'une plaque chargée positivement vers une plaque chargée négativement).

**2 a.** La force électrique qui s'exerce sur un électron placé en O a pour valeur  $F = |q| \times E$ .

$$\text{Or } |q| = e \text{ et } E = \frac{|U_{AB}|}{d}.$$

$$\text{Donc } F = e \times \frac{|U_{AB}|}{d}.$$

**b.** Valeur de la force électrique :

$$F = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times \frac{10 \times 10^3 \text{ V}}{10 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$F = 1,60 \times 10^{-13} \text{ N}$$

Valeur du poids d'un électron :

$$P = m \times g$$

$$P = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$P = 8,9 \times 10^{-30} \text{ N}$$

$$\frac{F}{P} = 1,8 \times 10^{16}; \text{ on a } F \gg P.$$

La valeur du poids de l'électron est négligeable devant celle de la force électrique qu'il subit.

**3** D'après le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{c_B} - \mathcal{E}_{c_A} = \sum_i W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_i)$$

Comme le poids de l'électron est négligeable devant la force électrique  $\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{c_B} - \mathcal{E}_{c_A} = W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$ .

$$\frac{1}{2} m_e \times v_B^2 - \frac{1}{2} m_e \times v_A^2 = q \times U_{AB} = -e \times U_{AB} \text{ avec } v_A \text{ négligeable.}$$

$$\text{Il vient } \frac{1}{2} m_e \times v_B^2 = -e \times U_{AB}$$

$$\text{D'où } v_B = \sqrt{\frac{-2e \times U_{AB}}{m_e}}$$

$$\mathbf{4} \quad v_B = \sqrt{\frac{-2 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times (-10 \times 10^3 \text{ V})}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$v_B = 5,9 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur de la vitesse de l'électron à la sortie du canon est  $5,9 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$\frac{v_B}{c} = \frac{5,9 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 0,20 \text{ ou } 20 \%$$

À des potentiels d'accélération de l'ordre de 10 kV, l'électron atteint à l'anode une vitesse dont la valeur est environ 20 % de celle de la lumière dans le vide.

## Un pas vers le cours

**5** Pour déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée, accélérée par un champ électrique uniforme :

- On fait l'inventaire des forces qui s'appliquent sur la particule.
- On vérifie que le poids est négligeable devant la force électrique subie par la particule.
- On applique le théorème de l'énergie cinétique entre la position initiale et la position finale de la particule.
- On en déduit la valeur de la vitesse atteinte par la particule.

## Capsule vidéo de cours : Mouvement dans un champ uniforme

### QCM

**1. C ; 2. A ; 3. A, B et C ; 4. C ; 5. C ; 6. B ; 7. A ; 8. B**

p. 35

## Exercices

### Appliquer le cours

p. 38

#### **2** Reconnaître un champ vectoriel uniforme (1)

Un champ vectoriel est uniforme si en tout point de l'espace il garde la même direction, le même sens et la même valeur. Le champ 3 est donc uniforme.

#### **3** Reconnaître un champ vectoriel uniforme (2)

Seuls les champs **b** et **d** sont uniformes car ils ont même direction, même sens et même valeur en tout point de l'espace.

#### **4** Étudier le champ électrique entre les armatures d'un condensateur plan

**1.** D'après l'expression de  $E$  fournie,  $|U_{AB}| = E \times d$ .  
 $|U_{AB}| = 1,0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1} \times 10,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ .

La valeur absolue  $|U_{AB}|$  de la tension est  $1,0 \times 10^3 \text{ V}$ .

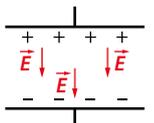
**2.** La valeur  $E$  du champ électrique est inversement proportionnelle à la distance  $d$  entre les armatures. Lorsque  $d$  augmente,  $E$  diminue.

#### **5** Caractériser le champ électrique entre les armatures d'un condensateur plan

**1.** Le champ électrique a une direction perpendiculaire aux armatures du condensateur. Il est orienté de l'armature chargée positivement vers celle chargée négativement.

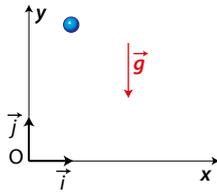
Sa valeur est  $E = \frac{|U|}{d} = \frac{10 \times 10^3 \text{ V}}{20,0 \times 10^{-2} \text{ m}} = 5,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ .

**2.** Ce champ électrique  $\vec{E}$  est uniforme : il a partout, entre les plaques, même direction, même sens et même valeur.



## 6 Exprimer le vecteur accélération (1)

1. Le système étudié est le centre de masse d'une bille dans un référentiel galiléen. La bille n'est soumise qu'à son poids  $\vec{P}$ . D'après la deuxième loi de Newton,  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  avec  $\vec{P} = m\vec{g}$ . Il vient  $\vec{a} = \vec{g}$ . Le vecteur accélération de cette bille est égal au vecteur champ de pesanteur.

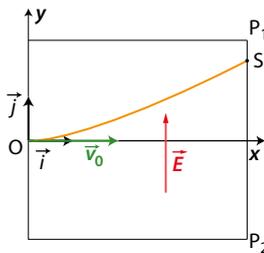


2. Les coordonnées du vecteur accélération sont celles de  $\vec{g}$  :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$$

## 7 Exprimer le vecteur accélération (2)

1. On constate sur la figure que le positon est dévié vers le haut. La force électrique  $\vec{F}$ , perpendiculaire aux plaques  $P_1$  et  $P_2$  doit donc être orientée vers le haut, soit de  $P_2$  vers  $P_1$ . La force et le champ électriques sont liés par la relation  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Dans la situation étudiée,  $q = +e$  avec  $e > 0$ . Les vecteurs  $\vec{F}$  et  $\vec{E}$  sont donc colinéaires et de même sens.



2. Le système étudié est le positon dans un référentiel terrestre supposé galiléen. Le positon n'est soumis qu'à la force électrique  $\vec{F}$ . D'après la deuxième loi de Newton,  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ .

Avec  $\sum \vec{F} = \vec{F} = e\vec{E}$ , il vient  $\vec{a} = \frac{e}{m}\vec{E}$ .

Comme  $\frac{e}{m} > 0$ , les vecteurs accélération  $\vec{a}$  et champ électrique  $\vec{E}$  sont colinéaires et de même sens.

Les coordonnées du vecteur accélération sont :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \frac{e}{m} \times E \end{cases}$$

## 8 Exprimer les conditions initiales

1. L'étude du mouvement du poids se fait dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

2. Le vecteur position initiale a pour coordonnées :

$$\overline{OG_0} \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 2,0 \text{ m} \end{cases}$$

Le vecteur vitesse initiale a pour coordonnées :

$$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = v_0 \times \cos\alpha \\ v_{y_0} = v_0 \times \sin\alpha \end{cases} \text{ avec } \alpha = 45^\circ \text{ d'où } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = \frac{\sqrt{2}}{2}v_0 \\ v_{y_0} = \frac{\sqrt{2}}{2}v_0 \end{cases}$$

## 9 Identifier les conditions initiales

Les schémas a et b correspondent aux conditions initiales du vecteur position.

Seul le schéma b correspond aux conditions initiales du vecteur  $\vec{v}_0$  qui a une coordonnée  $v_{z_0}$  négative ; c'est donc celui que l'on retient.

## 10 Établir l'équation de la trajectoire

De l'équation horaire  $x = 4,08t$ , on obtient  $t = \frac{x}{4,08}$ .

On remplace  $t$  dans l'autre équation horaire :

$$y = -4,88 \times \left(\frac{x}{4,08}\right)^2 + 4,91 \times \frac{x}{4,08} + 2,27.$$

D'où l'équation cartésienne de la trajectoire du centre de masse de cette bille :

$$y = -0,293x^2 + 1,20x + 2,27, \text{ avec } x \text{ et } y \text{ en mètre.}$$

## 11 Identifier l'équation d'une trajectoire

La représentation graphique fournie est celle de la trajectoire d'un point mobile modélisant la bille étudiée. Son équation cartésienne est donc de la forme  $y = f(x)$ .

Ceci exclut l'équation c qui est une équation horaire de la forme  $y = f(t)$ .

L'ordonnée à l'origine est  $y(0) \approx 2,2 \text{ m}$ .

Seule l'équation b respecte cette condition initiale.

## 12 Établir les équations horaires (1)

1. Pour établir les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse du ballon, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération, puis utiliser les conditions initiales indiquées.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ donc } \vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = -g \times t + C_y \end{cases}$$

$$\text{De plus } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = v_0 \times \cos\alpha \\ v_{y_0} = v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

$$\text{Il vient } \begin{cases} C_x = v_0 \times \cos\alpha \\ -g \times 0 + C_y = v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

$$\text{d'où } \begin{cases} C_x = v_0 \times \cos\alpha \\ C_y = v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y = -g \times t + v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

2. Les équations horaires du mouvement sont les coordonnées du vecteur position  $\overline{OP}$  du ballon assimilé à un point matériel P. Il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur vitesse puis utiliser les conditions initiales indiquées.

$$\vec{v} = \frac{d\overline{OP}}{dt} \text{ donc } \overline{OP} \begin{cases} x = v_0 \times \cos\alpha \times t + D_x \\ y = -\frac{1}{2} \times g \times t^2 + v_0 \sin\alpha \times t + D_y \end{cases}$$

$$\text{De plus } \overline{OP}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 0 \text{ m} \end{cases}$$

$$\text{Il vient } \begin{cases} v_0 \times \cos\alpha \times 0 + D_x = 0 \\ -\frac{1}{2} \times g \times 0^2 + v_0 \times \sin\alpha \times 0 + D_y = 0 \end{cases}$$

$$\text{D'où } \begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = 0 \end{cases}$$

Les équations horaires du mouvement du ballon s'écrivent :

$$\overline{OP} \begin{cases} x = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t \end{cases}$$

## 13 Établir les équations horaires (2)

1. Coordonnées cartésiennes du vecteur position à  $t = 0 \text{ s}$  :

$$\overline{OG_0} \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 0 \text{ m} \end{cases}$$

Coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse à  $t = 0$  s :

$$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = v_0 \times \cos \alpha \\ v_{y_0} = -v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

2. On étudie le positon de masse  $m$  et de charge  $e$  dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

On considère qu'il n'est soumis qu'à la force électrique  $\vec{F}$ .

D'après la deuxième loi de Newton :  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ .

Avec  $\Sigma \vec{F} = \vec{F} = e\vec{E}$ , il vient  $\vec{a} = \frac{e}{m}\vec{E}$ .

3. Comme  $\frac{e}{m} > 0$ , les vecteurs accélération  $\vec{a}$  et champ électrique  $\vec{E}$  sont colinéaires et de même sens.

La valeur du vecteur accélération est :  $a = \frac{e}{m} \times E$ .

Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération s'écrivent :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \frac{e}{m} \times E \end{cases}$$

Pour écrire les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération puis utiliser les conditions initiales.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ donc } \vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = \frac{e}{m} \times E \times t + C_y \end{cases}$$

$$\text{De plus } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = v_0 \times \cos \alpha \\ v_{y_0} = -v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

$$\text{Il vient } \begin{cases} C_x = v_0 \times \cos \alpha \\ \frac{e}{m} \times E \times 0 + C_y = -v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

$$\text{D'où } \begin{cases} C_x = v_0 \times \cos \alpha \\ C_y = -v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos \alpha \\ v_y = \frac{e}{m} \times E \times t - v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

Pour écrire les coordonnées cartésiennes du vecteur position, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur

vitesse puis utiliser les conditions initiales :  $\vec{v} = \frac{d\text{OG}}{dt}$

$$\text{donc } \overline{\text{OG}} \begin{cases} x = v_0 \times \cos \alpha \times t + D_x \\ y = \frac{e}{2m} \times E \times t^2 - v_0 \times \sin \alpha \times t + D_y \end{cases}$$

$$\text{De plus } \overline{\text{OG}}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 0 \text{ m} \end{cases}$$

$$\text{Il vient } \begin{cases} v_0 \times \cos \alpha \times 0 + D_x = 0 \\ \frac{e}{2m} \times E \times 0^2 - v_0 \times \sin \alpha \times 0 + D_y = 0 \end{cases}$$

$$\text{D'où } \begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = 0 \end{cases}$$

Les équations horaires du mouvement du positon s'écrivent :

$$\overline{\text{OG}} \begin{cases} x = v_0 \times \cos \alpha \times t \\ y = \frac{e}{2m} \times E \times t^2 - v_0 \times \sin \alpha \times t \end{cases}$$

#### 14 Appliquer la conservation de l'énergie

1. La balle n'est soumise qu'à son poids qui est une force conservative. Son énergie mécanique est donc conservée.

$$2. \Delta \mathcal{E}_{m_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{m_B} - \mathcal{E}_{m_A} = 0$$

$$\mathcal{E}_{c_B} + \mathcal{E}_{p_B} - (\mathcal{E}_{c_A} + \mathcal{E}_{p_A}) = 0$$

$$\frac{1}{2} m \times v_B^2 + m \times g \times z_B - \left( \frac{1}{2} m \times v_A^2 + m \times g \times z_A \right) = 0$$

Avec  $z_B = 0$ ,  $v_A = v_0$  et  $z_A = H$  m, il vient :

$$\frac{1}{2} m \times v_B^2 - \frac{1}{2} m \times v_0^2 - m \times g \times H = 0$$

$$\text{soit } \frac{1}{2} v_B^2 - \frac{1}{2} v_0^2 - g \times H = 0.$$

En isolant  $v_B$ , on peut écrire :  $v_B = \sqrt{v_0^2 + 2g \times H}$ .

$$3. v_B = \sqrt{\left( \frac{126}{3,6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \right)^2 + 2 \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 2,7 \text{ m}}$$

$$v_B = 36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La balle de tennis, lorsqu'elle touche le sol, a une vitesse de valeur  $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### 15 Appliquer le théorème de l'énergie cinétique

Le système étudié est l'électron dans un référentiel terrestre supposé galiléen. D'après le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{c_B} - \mathcal{E}_{c_A} = \sum_i W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_i)$$

Il n'est soumis qu'à la force électrique due au champ électrique uniforme dû au condensateur plan donc :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{c_B} - \mathcal{E}_{c_A} = W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$$

$$\frac{1}{2} m_e \times v_B^2 - \frac{1}{2} m_e \times v_A^2 = q \times U_{AB} = -e \times U_{AB}$$

Comme la vitesse initiale  $v_A$  a une valeur négligeable, la relation précédente devient  $\frac{1}{2} m_e \times v_B^2 = -e \times U_{AB}$ .

$$\text{D'où } v_B = \sqrt{\frac{-2e \times U_{AB}}{m_e}} \text{ avec } U_{AB} < 0.$$

## Exercices

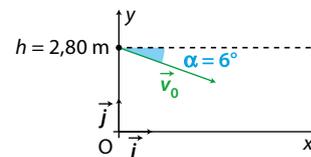
## S'entraîner

p. 41

#### 16 Connaître les critères de réussite

##### Service au tennis

1. Schématisation du centre B de la balle de tennis à  $t = 0$  s.



2. Dans un référentiel terrestre supposé galiléen, le système n'est soumis qu'à son poids  $\vec{P}$  car on néglige les actions dues à l'air.

D'après la deuxième loi de Newton,  $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}$  avec  $\Sigma \vec{F} = \vec{P} = m \vec{g}$ . Il vient  $\vec{a} = \vec{g}$ .

Le vecteur accélération de la balle de tennis soumise qu'à son poids est égal au vecteur champ de pesanteur.

3. Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération sont :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$$

Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps :  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ .

Pour déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération puis utiliser les conditions initiales indiquées.

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = -g \times t + C_y \end{cases}$$

De plus,  $\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x0} = v_0 \times \cos\alpha \\ v_{y0} = -v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$

Il vient  $\begin{cases} C_x = v_0 \times \cos\alpha \\ -g \times 0 + C_y = -v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$

D'où  $\begin{cases} C_x = v_0 \times \cos\alpha \\ C_y = -v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y = -g \times t - v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :  $\vec{v} = \frac{d\vec{OB}}{dt}$

Pour déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur position ou équations horaires, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur vitesse puis utiliser les conditions initiales indiquées.

$$\vec{OB} \begin{cases} x = v_0 \times \cos\alpha \times t + D_x \\ y = -\frac{1}{2}g \times t^2 - v_0 \times \sin\alpha \times t + D_y \end{cases}$$

De plus,  $\vec{OB}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = h \end{cases}$

Il vient  $\begin{cases} v_0 \times \cos\alpha \times 0 + D_x = 0 \\ -\frac{1}{2}g \times 0^2 - v_0 \times \sin\alpha \times 0 + D_y = h \end{cases}$

D'où  $\begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = h \end{cases}$

Les équations horaires du mouvement de la balle de tennis s'écrivent :

$$\vec{OB} \begin{cases} x = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y = -\frac{1}{2}g \times t^2 - v_0 \times \sin\alpha \times t + h \end{cases}$$

4. De l'équation horaire  $x = v_0 \times \cos\alpha \times t$ , on extrait :

$$t = \frac{x}{v_0 \times \cos\alpha}$$

On remplace  $t$  par son expression en fonction de  $x$  dans l'équation horaire :

$$y = -\frac{1}{2}g \times t^2 - v_0 \times \sin\alpha \times t + h$$

Il vient :

$$y = -\frac{1}{2}g \times \left(\frac{x}{v_0 \times \cos\alpha}\right)^2 - v_0 \times \sin\alpha \times \frac{x}{v_0 \times \cos\alpha} + h$$

D'où  $y = -\frac{g}{2(v_0 \times \cos\alpha)^2} \times x^2 - \tan\alpha \times x + h$

C'est l'équation cartésienne de la trajectoire de la balle de tennis dont chaque terme est bien homogène à une distance.

5. La balle passe au-dessus du filet si, pour l'abscisse  $x = L$ , son ordonnée  $y$  est supérieure à  $H$ .

L'équation de la trajectoire de la balle permet de le vérifier :

$$y(L) = -\frac{g}{2(v_0 \times \cos\alpha)^2} \times L^2 - \tan\alpha \times L + h$$

$$y(L) = -\frac{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{2(47,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \cos(6,0^\circ))^2} \times (11,90 \text{ m})^2 - \tan(6,0^\circ) \times 11,90 \text{ m} + 2,80 \text{ m}$$

$$y(L) = 1,23 \text{ m}$$

$y(L) > H$ , la balle passe bien au-dessus du filet.

## 17 Côté maths

### Déterminer des primitives

1. Le système étudié est la balle dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

La balle n'est soumise qu'à son poids  $\vec{P}$  puisqu'on néglige les actions dues à l'air.

D'après la deuxième loi de Newton,  $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}$  avec  $\Sigma \vec{F} = \vec{P} = m \vec{g}$ .

Il vient  $\vec{a} = \vec{g}$ .

Le vecteur accélération de la balle soumise qu'à son poids est égal au vecteur champ de pesanteur.

L'axe ( $Oz$ ) est orienté vers le bas, donc le vecteur accélération a pour coordonnées verticales  $a_z = g$ .

2. La coordonnée cartésienne  $v_z$  du vecteur vitesse est la primitive de la coordonnée cartésienne  $a_z$  du vecteur accélération :

$$v_z = g \times t + C_z$$

La balle est lâchée sans vitesse initiale :  $v_{z0} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Il vient  $g \times 0 + C_z = 0$  d'où  $v_z = g \times t$ .

3. La coordonnée cartésienne  $z$  du vecteur position est la primitive de la coordonnée cartésienne  $v_z$  du vecteur vitesse :

$$z = \frac{1}{2}g \times t^2 + D_z$$

La balle est lâchée depuis l'origine du repère :  $z_0 = 0 \text{ m}$ .

Il vient  $\frac{1}{2}g \times 0^2 + D_z = 0$ .

La coordonnée cartésienne du vecteur position a pour expression

$$z = \frac{1}{2}g \times t^2$$

## 18 Python

### Trajectoire d'une particule chargée

Ressources pour le professeur à télécharger :

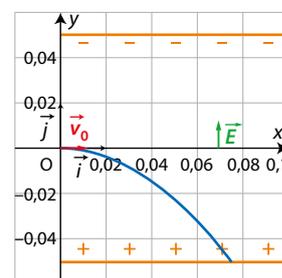
- Fichiers Python
- Explications du programme en langage Python

1. Le champ électrique entre les armatures d'un condensateur plan a pour valeur  $E = \frac{|U|}{d}$ . Dans cette relation,  $U$  est la tension électrique entre les plaques et  $d$  la distance qui les sépare.

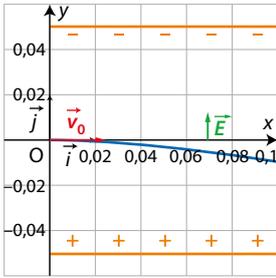
Pour modifier la valeur de  $E$ , on peut donc modifier  $U$  ou  $d$ .

2.a. On utilise le programme Python fourni pour observer l'influence de la valeur de la vitesse initiale sur la trajectoire d'un électron, pour  $E = 1,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  et pour un angle de tir nul.

- Courbe obtenue pour  $v_0 = 1,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  :



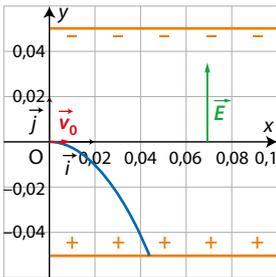
- Courbe obtenue pour  $v_0 = 3,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  :



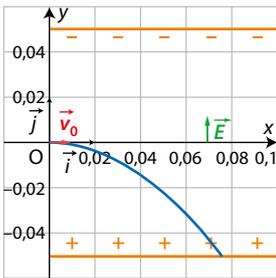
Conclusion : La trajectoire est de moins en moins incurvée lorsque la valeur de la vitesse initiale augmente.

b. On utilise le programme Python fourni pour observer l'influence de la valeur du champ électrique sur la trajectoire d'un électron, pour  $v_0 = 1,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et pour un angle de tir nul.

- Courbe obtenue pour  $E = 3,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  :



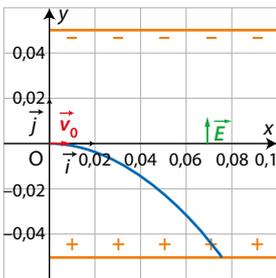
- Courbe obtenue pour  $E = 1,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  :



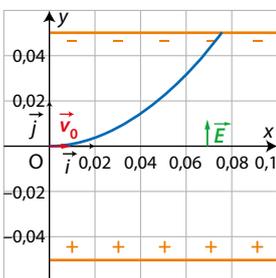
Conclusion : La trajectoire est de moins en moins incurvée lorsque la valeur du champ électrique  $E$  diminue.

3. On utilise le programme Python fourni pour observer l'influence du signe de la charge la trajectoire d'une particule, pour  $v_0 = 1,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , pour un angle de tir nul et pour  $E = 1,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ .

- Courbe obtenue pour un électron de charge  $q = -e$  :



- Courbe obtenue pour un positon de charge  $q = +e$  :

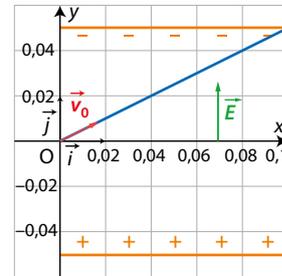


Conclusion : Le signe de la charge de la particule donne le sens de l'incurvation de la trajectoire : vers le haut pour des particules chargées positivement, vers le bas pour des particules chargées négativement.

4. Toutes ces observations sont en accord avec l'équation de la trajectoire :

$$y = \frac{q \times E}{2m \times (v_0 \times \cos\alpha)^2} x^2 + \tan\alpha \times x .$$

5. On se place dans le cas d'un proton pour lequel  $v_0 = 2,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  placé dans un champ de valeur :  $E = 2,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ .



Les simulations réalisées avec le programme Python conduisent à  $\alpha = 27^\circ$ .

On peut vérifier cette valeur à partir de l'équation de la trajectoire :

$$y = \frac{e \times E}{2m_e \times (v_0 \times \cos\alpha)^2} x^2 + \tan\alpha \times x .$$

On relève sur le schéma de la situation :

- longueur des plaques  $\ell = 0,10 \text{ m}$  ;
- hauteur des plaques  $h = 0,05 \text{ m}$ .

On remplace dans l'équation de la trajectoire  $x$  par  $\ell$  et  $\alpha$  par  $27^\circ$ . On cherche alors la valeur de  $h$  pour les valeurs de  $e$ ,  $E$ ,  $v_0$  et  $m_e$  données :

$$h = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}}{2 \times 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (2,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \cos(27^\circ))^2} \times (0,10 \text{ m})^2 + \tan(27^\circ) \times 0,10 \text{ m}$$

$$h = 0,051 \text{ m} .$$

La valeur de  $y$  obtenue montre que le proton atteint la plaque supérieure à partir d'un angle  $\alpha = 27^\circ$ .

## 19 Penalty in rugby

**Traduction :** Un joueur de rugby tente une pénalité 38 mètres face aux poteaux.

Nous nous intéressons au mouvement du centre de masse  $G$  du ballon.

Les frottements de l'air sur le ballon sont négligés.

À l'instant initial, il frappe le ballon qui part avec une vitesse de valeur  $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et selon une direction formant un angle de  $55^\circ$  avec l'horizontal.

1. Déterminer les coordonnées des vecteurs accélération, vitesse et position de  $G$ .
2. Établir l'équation de la trajectoire du ballon.
3. Est-ce que le ballon passe au-dessus de la barre située à  $3,0 \text{ m}$  au-dessus du sol ?

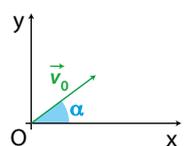
### Réponses

1. Le système étudié est le centre de masse  $G$  du ballon de rugby dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

Les conditions initiales du ballon sont schématisées ci-contre.

Le ballon n'est soumis qu'à son poids  $\vec{P}$  car on néglige les actions dues à l'air.

D'après la deuxième loi de Newton,  $\sum \vec{F} = m \vec{a}$  avec  $\sum \vec{F} = \vec{P} = m \vec{g}$ , il vient  $\vec{a} = \vec{g}$ .



Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération sont :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$$

Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps :  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ .

Pour déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération puis utiliser les conditions initiales indiquées.

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = -g \times t + C_y \end{cases}$$

De plus,  $\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x0} = v_0 \times \cos\alpha \\ v_{y0} = v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$ .

Il vient  $\begin{cases} C_x = v_0 \times \cos\alpha \\ -g \times 0 + C_y = v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$ .

D'où  $\begin{cases} C_x = v_0 \times \cos\alpha \\ C_y = v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$ .

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y = -g \times t + v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :  $\vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}$ .

Pour déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur position ou équations horaires, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur vitesse puis appliquer les conditions initiales indiquées.

$$\vec{OG} \begin{cases} x = v_0 \times \cos\alpha \times t + D_x \\ y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t + D_y \end{cases}$$

De plus,  $\vec{OG}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 0 \text{ m} \end{cases}$ .

Il vient  $\begin{cases} v_0 \times \cos\alpha \times 0 + D_x = 0 \\ -\frac{1}{2}g \times 0^2 + v_0 \times \sin\alpha \times 0 + D_y = 0 \end{cases}$ .

D'où  $\begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = 0 \end{cases}$ .

Les équations horaires du mouvement du ballon de rugby s'écrivent :

$$\vec{OG} \begin{cases} x = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t \end{cases}$$

2. De l'équation horaire  $x = v_0 \times \cos\alpha \times t$  on extrait :

$$t = \frac{x}{v_0 \times \cos\alpha}$$

On remplace  $t$  par son expression en fonction de  $x$  dans l'équation horaire  $y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t$ .

Il vient  $y = -\frac{1}{2}g \times \left(\frac{x}{v_0 \times \cos\alpha}\right)^2 + v_0 \times \sin\alpha \times \frac{x}{v_0 \times \cos\alpha}$

D'où  $y = -\frac{g}{2 \times (v_0 \times \cos\alpha)^2} \times x^2 + \tan\alpha \times x$ .

C'est l'équation cartésienne de la trajectoire du ballon de rugby.

3. Le ballon passe au-dessus de la barre transversale si son ordonnée, pour une abscisse  $x = 38 \text{ m}$ , est supérieure à  $h = 3,0 \text{ m}$ .

Pour cela, on utilise l'équation de la trajectoire de la balle :

$$y = -\frac{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{2 \times (21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \cos(55^\circ))^2} \times 38^2 \text{ m}^2 + \tan(55^\circ) \times 38 \text{ m}$$

$$y = 5,5 \text{ m}$$

$y > h$ , le ballon de rugby passe bien au-dessus de la barre transversale.

## 20 À chacun son rythme

### L'expérience de J. J. THOMSON

1. L'électron est soumis à la force électrique qui a pour expression :  $\vec{F} = -e \vec{E}$ .

2. On étudie l'électron, objet ponctuel G, de masse  $m_e$  et de charge  $-e$  dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

L'électron n'est soumis qu'à la force électrique  $\vec{F}$ .

D'après la deuxième loi de Newton,  $\Sigma \vec{F} = m_e \vec{a}$ .

Or,  $\Sigma \vec{F} = \vec{F} = m_e \vec{a}$ .

Il vient  $\vec{a} = \frac{-e \vec{E}}{m_e}$ .

Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération s'écrivent :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \frac{e}{m_e} \times E \end{cases}$$

Sur le schéma, l'électron est dévié vers le haut. La force électrique est donc orientée vers le haut et la coordonnée  $a_y$  est positive.

Pour écrire les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération puis appliquer les conditions initiales.

$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$  donc  $\vec{v} \begin{cases} v_x = C \\ v_y = \frac{e}{m_e} \times E \times t + C_y \end{cases}$ .

De plus,  $\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x0} = v_0 \\ v_{y0} = 0 \end{cases}$ .

Il vient  $\begin{cases} C_x = v_0 \\ \frac{e}{m_e} \times E \times 0 + C_y = 0 \end{cases}$ . D'où  $\begin{cases} C_x = v_0 \\ C_y = 0 \end{cases}$ .

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = \frac{e}{m_e} \times E \times t \end{cases}$$

Pour écrire les coordonnées cartésiennes du vecteur position, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur vitesse puis appliquer les conditions initiales.

$\vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}$  donc  $\vec{OG} \begin{cases} x = v_0 \times t + D_x \\ y = \frac{e}{2m_e} \times E \times t^2 + D_y \end{cases}$ .

De plus,  $\vec{OG}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 0 \text{ m} \end{cases}$ .

Il vient  $\begin{cases} v_0 \times 0 + D_x = 0 \\ \frac{e}{2m_e} \times E \times 0^2 + D_y = 0 \end{cases}$ .

D'où  $\begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = 0 \end{cases}$ .

Les équations horaires du mouvement de l'électron s'écrivent :

$$\vec{OG} \begin{cases} x = v_0 \times t \\ y = \frac{e}{2m_e} \times E \times t^2 \end{cases}$$

3. De l'équation horaire  $x = v_0 \times t$  on extrait  $t = \frac{x}{v_0}$ .

On remplace  $t$  par son expression en fonction de  $x$  dans l'équation horaire  $y = \frac{e}{2m_e} \times E \times t^2$ .

Il vient  $y = \frac{e}{2m_e} \times E \times \left(\frac{x}{v_0}\right)^2$  d'où  $y = \frac{e \times E}{2m_e \times v_0^2} \times x^2$ .

C'est l'équation cartésienne de la trajectoire de l'électron.

4. Lorsque l'abscisse de l'électron  $x = L$  alors  $y = HS$ .

D'après l'équation de la trajectoire,  $HS = \frac{e \times E}{2m_e \times v_0^2} \times L^2$ .

Il vient  $\frac{e}{m_e} = \frac{2v_0^2 \times HS}{E \times L^2}$

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2 \times (2,4 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \times 2,0 \times 10^{-2} \text{ m}}{1,6 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \times (9,0 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$\frac{e}{m_e} = 1,8 \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

### 21 CORRIGÉ Émission de rayons X par collision avec des électrons

1.a. La force électrique subie par un électron est :  $\vec{F} = -e \vec{E}$ .

b.  $\vec{F}$  et  $\vec{E}$  sont donc colinéaires. La charge d'un électron étant négative, ces deux vecteurs sont de sens opposés.

2. Calculons le rapport  $\frac{F}{P}$  avec :

$$F = |-e| \times E = |-e| \times \frac{|U_{OA}|}{OA} \text{ et } P = m_e \times g.$$

$$\frac{F}{P} = \frac{|-e| \times \frac{|U_{OA}|}{OA}}{m_e \times g}$$

$$\frac{F}{P} = \frac{|-1,60 \times 10^{-19}| \text{ C} \times \frac{|-50 \times 10^3| \text{ V}}{2,0 \times 10^{-2} \text{ m}}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$$

$\frac{F}{P} = 4,5 \times 10^{16}$ . La valeur du poids est négligeable devant celle de la force électrique puisque  $4,5 \times 10^{16}$  fois plus faible qu'elle.

3. Le système étudié est l'électron dans un référentiel supposé galiléen. Il n'est soumis qu'à la force électrique. D'après le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{O \rightarrow A}} = \mathcal{E}_{c_A} - \mathcal{E}_{c_O} = W_{O \rightarrow A}(\vec{F})$$

$$\frac{1}{2} m_e \times v_A^2 - \frac{1}{2} m_e \times v_O^2 = -e \times U_{OA} \text{ avec } v_O \text{ nulle.}$$

$$\text{Il vient } \frac{1}{2} m_e \times v_A^2 = -e \times U_{OA}$$

$$\text{D'où } v_A = \sqrt{\frac{-2e \times U_{OA}}{m_e}} \text{ avec } U_{OA} \text{ négative}$$

4. Application numérique :

$$v_A = \sqrt{\frac{-2 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times (-50 \times 10^3 \text{ V})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$v_A = 1,3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

## Vers le Bac

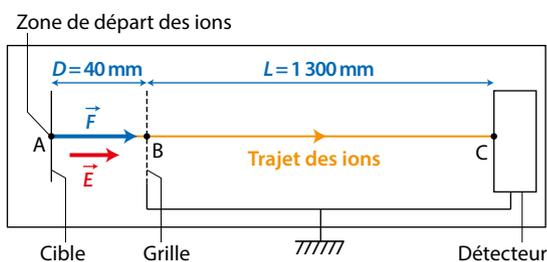
p. 43

### Préparation à l'écrit

#### 22 CORRIGÉ Le spectromètre de masse

1. a. Pour que les fragments  $F_i^+$  de charge  $q_i$  soient accélérés de la cible vers la grille, la force électrique  $F$  doit être horizontale et orientée vers la droite.

Or  $\vec{F} = q_i \vec{E}$  avec  $q_i = +e > 0$ . Ainsi le champ électrique  $\vec{E}$  est colinéaire et de même sens que la force électrique  $\vec{F}$ .



b. Le système étudié est un fragment  $F_i^+$  dans un référentiel terrestre supposé galiléen. Il n'est soumis qu'à la force électrique due au champ électrique uniforme créé par le condensateur plan entre A et B.

D'après le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{c_B} - \mathcal{E}_{c_A} = W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$$

$$\frac{1}{2} m \times v_B^2 - \frac{1}{2} m \times v_A^2 = q_i \times U_{AB} = e \times U.$$

$$\text{Comme } v_A = 0 \text{ vient } \frac{1}{2} m \times v_B^2 = e \times U.$$

$$\text{D'où } v_B = \sqrt{\frac{2e \times U}{m}}.$$

c. Application numérique

$$v_B = \sqrt{\frac{2 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 20 \times 10^3 \text{ V}}{7,1 \times 10^{-26} \text{ kg}}}$$

$$v_B = 3,0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. Entre la grille et le détecteur, il n'y a plus de champ électrique : les fragments ne sont plus soumis à la force électrique. Par ailleurs, le poids de chaque fragment est négligé dans l'étude. Ainsi entre la grille et le détecteur, les fragments ne sont soumis à aucune force.

D'après le principe d'inertie, les fragments sont animés d'un mouvement rectiligne uniforme à la vitesse de valeur  $v_B$ .

La durée mise par les fragments pour parcourir la distance BC est

$$\Delta t_{BC} = \frac{L}{v_B} \text{ et comme } v_B = \sqrt{\frac{2e \times U}{m}}, \text{ il vient } \Delta t_{BC} = L \times \sqrt{\frac{m}{2e \times U}}.$$

3. a. • D'après la deuxième loi de Newton appliquée à un fragment entre A et B,  $\vec{F} = m \vec{a}$  avec  $\vec{F} = e \vec{E}$ .

$$\text{Il vient } \vec{a} = \frac{e}{m} \vec{E}.$$

On choisit un repère cartésien  $Ox$  muni d'un axe  $Ox$  parallèle à AB et dont l'origine est confondue avec A.

L'unique coordonnée cartésienne du vecteur accélération dans le repère  $Ox$  s'écrit :  $a_x = \frac{e}{m} \times E$ .

• Pour écrire la coordonnée cartésienne du vecteur vitesse, il faut chercher la primitive de la coordonnée du vecteur accélération puis appliquer les conditions initiales.

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \text{ donc } v_x = \frac{e}{m} \times E \times t + C_x; \text{ de plus } \vec{v}_0 = \vec{v}_A \text{ avec } v_{x0} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\text{Il vient } \frac{e}{m} \times E \times 0 + C_x = 0 \text{ d'où } C_x = 0.$$

La coordonnée cartésienne du vecteur vitesse s'écrit donc  $v_x = \frac{e}{m} \times E \times t$ .

• Pour écrire la coordonnée cartésienne du vecteur position, il faut chercher la primitive de la coordonnée du vecteur vitesse puis appliquer les conditions initiales. Si on note G le centre de masse d'un fragment,  $\vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}$  donc  $x = \frac{e}{2m} \times E \times t^2 + D_x$ ; de plus  $x_0 = 0$  m ; il vient  $\frac{e}{2m} \times E \times 0^2 + D_x = 0$  d'où  $D_x = 0$ .

L'équation horaire du mouvement du fragment s'écrit :

$$x = \frac{e}{2m} \times E \times t^2.$$

• Le fragment parcourt la distance  $x = D$ , pendant la durée  $\Delta t_{AB}$  telle que  $D = \frac{e}{2m} \times E \times (\Delta t_{AB})^2$ , on a donc  $\Delta t_{AB} = \sqrt{\frac{2D \times m}{e \times E}}$ .

$$\text{Or } E = \frac{U}{D} \text{ donc } \Delta t_{AB} = \sqrt{\frac{2D \times m}{e \times \frac{U}{D}}} \text{ soit } \Delta t_{AB} = D \times \sqrt{\frac{2m}{e \times U}}.$$

**b.** Le temps de vol  $\tau = \Delta t_{AB} + \Delta t_{BC}$ .

$$\tau = D \times \sqrt{\frac{2m}{e \times U}} + L \times \sqrt{\frac{m}{2e \times U}}.$$

**c.** Plus la masse est grande plus le temps de vol est long : ce qui permet de séparer les fragments.

## 23 Service et réception au volley

### Partie I

**1.** Le système étudié est le centre de masse B du ballon de volley-ball dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

Le ballon n'est soumis qu'à son poids  $\vec{P}$  car on néglige les actions dues à l'air. D'après la deuxième loi de Newton,  $\vec{P} = m\vec{a}$  avec  $\vec{P} = m\vec{g}$ .

Il vient  $\vec{a} = \vec{g}$ .

Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération sont donc :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \\ a_z = 0 \end{cases}$$

**2.** La trajectoire est contenue dans le plan défini par la vitesse initiale  $\vec{v}_0$  et l'accélération constante  $\vec{a}$ . Ce plan contient le repère  $(Oxy)$ .

**3.** Par la suite, on limite l'étude du mouvement dans le repère  $(O; x, y)$ .

Pour déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération, puis appliquer les conditions initiales indiquées.

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = -g \times t + C_y \end{cases} \text{ De plus } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x0} = v_0 \\ v_{y0} = 0 \end{cases}$$

$$\text{Il vient } \begin{cases} C_x = v_0 \\ -g \times 0 + C_y = 0 \end{cases}.$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = -g \times t \end{cases}$$

Pour déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur position ou équations horaires, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur vitesse puis appliquer les conditions initiales indiquées.

$$\overline{OB} \begin{cases} x = v_0 \times t + D_x \\ y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + D_y \end{cases}$$

$$\text{De plus } \overline{OB}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = h \end{cases}$$

$$\text{Il vient } \begin{cases} v_0 \times 0 + D_x = 0 \\ -\frac{1}{2}g \times 0^2 + D_y = h \end{cases}$$

Les équations horaires du mouvement du ballon de volley

$$\text{s'écrivent : } \overline{OB} \begin{cases} x = v_0 \times t \\ y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + h \end{cases}$$

**4.** De l'équation horaire  $x = v_0 \times t$ , on écrit  $t = \frac{x}{v_0}$ .

On remplace  $t$  dans l'autre équation horaire :

$$y = -\frac{1}{2}g \times \left(\frac{x}{v_0}\right)^2 + h.$$

L'équation cartésienne de la trajectoire du ballon est :

$$y = -\frac{g}{2v_0^2} \times x^2 + h.$$

**5.** Le ballon touche le sol lorsque l'ordonnée de son centre de masse B est égale à  $r$ , rayon du ballon. Le ballon touche le sol avant la ligne de fond si  $x < L$ .

L'équation de la trajectoire du ballon permet de la vérifier.

$$r = -\frac{g}{2v_0^2} \times x^2 + h$$

Cette équation admet deux solutions :

$$x_1 = \sqrt{\frac{2v_0^2 \times (h-r)}{g}} \text{ et } x_2 = -\sqrt{\frac{2v_0^2 \times (h-r)}{g}}.$$

$x_2$  est ici physiquement impossible car de signe négatif.

Le ballon touche le sol pour :

$$x = \sqrt{\frac{2 \times (21,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \times (3,5 - 0,10) \text{ m}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}}$$

$x = 17,5$  m d'où  $x < L$ . Le ballon retombe sur le terrain de volley-ball.

**6.** Le système n'est soumis qu'à son poids. D'après le théorème de l'énergie cinétique appliqué entre les points  $B_0$  et  $B_{\text{sol}}$ , position du centre de masse du ballon lorsqu'il touche le sol :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{B_0 \rightarrow B_{\text{sol}}}} = \mathcal{E}_{c_{B_{\text{sol}}}} - \mathcal{E}_{c_{B_0}} = W_{B_0 \rightarrow B_{\text{sol}}}(\vec{P})$$

$$\frac{1}{2}m \times v_{\text{sol}}^2 - \frac{1}{2}m \times v_0^2 = m \times g \times (z_{B_0} - z_{B_{\text{sol}}})$$

$$\frac{1}{2}m \times v_{\text{sol}}^2 = m \times g \times (h-r) + \frac{1}{2}m \times v_0^2$$

$$\text{D'où } v_{\text{sol}} = \sqrt{2 \times g \times (h-r) + v_0^2}$$

$$v_{\text{sol}} = \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times (3,50 - 0,10 \text{ m}) + (21,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}$$

Le ballon touche le sol avec une vitesse de valeur  $22,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Partie II

Il faut chercher dans un premier temps l'abscisse du ballon de volley-ball lorsque son ordonnée est 80 cm.

Il faut ensuite calculer la date  $t$  à laquelle le ballon atteint cette altitude.

Connaissant le point de départ du joueur ( $\vec{p}$ ) et la position qu'il doit atteindre dans la durée  $t=0$ , on peut calculer la valeur de sa vitesse moyenne minimale.

**Abscisse du ballon de volley-ball lorsque son ordonnée est 80 cm**

On utilise pour cela l'équation de la trajectoire.

$$y = -\frac{g}{2v_0^2} \times x^2 + h$$

$$\text{Il vient } x = \sqrt{\frac{2v_0^2 \times (h-y)}{g}}$$

$$x = \sqrt{\frac{(2 \times 21,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 \times (3,5 - 0,80) \text{ m}}{9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}}}$$

$$x = 16 \text{ m.}$$

**Durée mise par le ballon pour atteindre cette altitude**

On utilise une des deux équations horaires.

$$x = v_0 \times t \text{ d'où } t = \frac{x}{v_0}. \text{ Il vient } t = \frac{16 \text{ m}}{21,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}$$

$$t = 0,76 \text{ s.}$$

Le ballon met 0,76 s pour atteindre une altitude de 80 cm.

**Valeur de la vitesse moyenne de l'adversaire**

Le joueur a une abscisse initiale de 17,0 m et doit atteindre en

0,76 s une abscisse de 16 m.  $v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{1,0 \text{ m}}{0,76 \text{ s}}$ . La valeur de la vitesse moyenne du joueur est environ  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



# 3

## Mouvement dans un champ de gravitation

### Programme officiel

#### Mouvement et interactions

2. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<b>Mouvement dans un champ de gravitation</b>  Mouvement des satellites et des planètes. Orbite. Lois de Kepler. Période de révolution. Satellite géostationnaire.	Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien. Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire. <b>Capacité numérique :</b> Exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.

### Liens avec les programmes officiels de première (enseignement de spécialité et enseignement scientifique)

Vocabulaire associé	Connaissances et savoir-faire	Modèles / Relations
Force de gravitation et champ de gravitation.	Utiliser les expressions vectorielles de la force de gravitation et du champ de gravitation.	$\vec{F} = -G \times \frac{m_B \times m_A}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ <p>G en <math>N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}</math>      m en kg</p> $\vec{G} = -G \times \frac{m_A}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$ <p>Valeur en <math>N \cdot kg^{-1}</math> ou <math>m \cdot s^{-2}</math>      d en m</p>

Capacité exigible

- Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien.

Analyse des documents

1 a. Dans le référentiel géocentrique, le mouvement d'un satellite géostationnaire est circulaire et sa période de révolution est la même que la période de rotation de la Terre autour de l'axe des pôles.

Un satellite géostationnaire étant immobile pour un observateur terrestre (doc. A), il est immobile dans un référentiel terrestre.

b. On extrait  $h$  de l'expression de  $T$  donnée dans le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE :

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \times M_T}}$$

$$T^2 = 4\pi^2 \times \frac{(R_T + h)^3}{G \times M_T} \text{ d'où } (R_T + h)^3 = \frac{T^2 \times G \times M_T}{4\pi^2}$$

$$R_T + h = \sqrt[3]{\frac{T^2 \times G \times M_T}{4\pi^2}} \text{ et } h = \sqrt[3]{\frac{T^2 \times G \times M_T}{4\pi^2}} - R_T$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{(23 \times 3600 + 56 \times 60)^2 (\text{s})^2 \times 6,67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 5,97 \times 10^{24} \text{kg}}{4\pi^2}} - 6,37 \times 10^6 \text{m}$$

$$h = 3,58 \times 10^7 \text{ m} = 3,58 \times 10^4 \text{ km.}$$

On retrouve bien une altitude voisine de 36 000 km.

Autre approche :

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \times M_T}} ; T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(6,37 \times 10^6 \text{ m} + 36\,000 \times 10^3 \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 5,97 \times 10^{24} \text{kg}}}$$

La période de révolution d'un satellite qui évolue à une altitude voisine de 36 000 km est  $8,68 \times 10^4 \text{ s}$ , soit proche de 24 h. On peut donc considérer ce satellite comme géostationnaire.

2 a. Un satellite géostationnaire évolue à une altitude de 36 000 km et est immobile pour un observateur terrestre.

Les satellites SPOT ne sont pas géostationnaires car ils évoluent à une altitude voisine de 820 km.

Les satellites METEOSAT observent constamment la même zone au-dessus de la Terre. Ils sont donc immobiles dans un référentiel terrestre ; ils sont géostationnaires.

b. L'ISS évolue à une altitude  $h_{\text{ISS}} = 410 \text{ km}$ . Dans l'approximation des mouvements circulaires, la période de l'ISS est :

$$T_{\text{ISS}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_T + h_{\text{ISS}})^3}{G \times M_T}}$$

$$T_{\text{ISS}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{(6,37 \times 10^6 \text{ m} + 410 \times 10^3 \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 5,97 \times 10^{24} \text{kg}}} = 5,56 \times 10^3 \text{ s.}$$

En 24 heures, l'ISS fait  $\frac{24 \times 3\,600 \text{ s}}{5,56 \times 10^3 \text{ s}} = 15,54$ , soit environ 16 fois le tour de la Terre, ce qui confirme l'affirmation de Thomas PESQUET.

Un pas vers le cours

- 3 Le mouvement des satellites artificiels est caractérisé par :
- leur orbite (trajectoire du satellite dans le référentiel géocentrique) ;
  - leur période de révolution (durée nécessaire pour effectuer un tour complet de trajectoire).

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité documentaire permet d'aborder sans le dire la troisième loi de Kepler. L'expression de la période de révolution d'un satellite autour de la Terre est donnée, ce qui évite la difficulté de son établissement pour une première activité.

Cette activité permet également de travailler sur les satellites géostationnaires.

## Activité 2

### numérique Les lois de Kepler à l'ère de l'informatique ..... p. 47

#### Capacités exigibles

- Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire.
- Exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.

#### Simulation numérique

1 À l'exécution du programme, pour chaque planète, on constate que la distance SA n'est pas égale à la distance SP : la trajectoire n'est pas rigoureusement un cercle centré sur le Soleil.

a. À l'exécution du programme, pour chaque planète, les aires balayées autour de A et P pendant des durées identiques sont égales à 3 chiffres significatifs près : la deuxième loi de Kepler est vérifiée.

Remarque : le paramètre « J » influe sur la durée des aires balayées autour des points A et P.

b. Les arcs interceptés sur la trajectoire de la planète pendant des durées identiques autour des points A et P n'ont pas la même longueur : la longueur de l'arc autour de P est supérieure à la longueur de l'arc autour de A. En conséquence, la valeur de la vitesse en P est supérieure à celle de la vitesse en A.

2 a. et b. Pour vérifier la troisième loi de Kepler, calculons  $\frac{T^2}{a^3}$ . Pour chaque planète, on a :

	Mercure	Venus	Terre	Mars
a (ua)	$3,87 \times 10^{-1}$	$7,23 \times 10^{-1}$	1,00	1,52
T (s)	$7,603 \times 10^6$	$1,944 \times 10^7$	$3,162 \times 10^7$	$5,936 \times 10^7$
$\frac{T^2}{a^3} (s^2 \cdot ua^3)$	$0,997 \times 10^{15}$	$1,00 \times 10^{15}$	$1,00 \times 10^{15}$	$1,00 \times 10^{15}$

En conservant deux chiffres significatifs :

$$\frac{T^2}{a^3} = 1,0 \times 10^{15} s^2 \cdot ua^3 = \text{constante.}$$

La troisième loi de Kepler est vérifiée.

3 La comète de Halley est en orbite autour du Soleil si :

$$\frac{T^2}{a^3} = 1,0 \times 10^{15} s^2 \cdot ua^3.$$

$$\left(\frac{T^2}{a^3}\right)_{\text{Halley}} = \frac{(76 \times 365,25 \times 24 \times 3600 \text{ s})^2}{(17,9 \text{ ua})^3} = 1,0 \times 10^{15} s^2 \cdot ua^3.$$

La comète de Halley orbite autour du Soleil.

#### Un pas vers le cours

4 Les lois de Kepler permettent de prévoir le mouvement des planètes autour du Soleil.

On peut généraliser en disant que ces lois permettent de décrire le mouvement d'un satellite autour de son astre central.

#### Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Le chapitre ne se prête pas à des activités expérimentales. Par une approche numérique via un programme en langage python, on change d'outil de travail tout en complétant l'étude des lois de Kepler.

#### Ressources pour le professeur à télécharger :

- Fichier Python
- Explications du programme en langage Python

#### Capsule vidéo de cours : Lois de Kepler

#### QCM

1. A ; 2. C ; 3. A ; 4. A et C ; 5. B ; 6. A et B ; 7. A et B ; 8. C.

#### Exercices

Appliquer le cours ..... p. 54

#### 2 Exploiter les coordonnées d'un vecteur accélération

1. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse de Phobos dans le référentiel marsocentrique considéré galiléen, on a :

$$\vec{F} = M_{\text{Phobos}} \vec{a} \quad \text{et} \quad \vec{F} = G \times \frac{M_{\text{Phobos}} \times M_{\text{Mars}}}{r^2} \vec{u}_n$$

$$\text{d'où } M_{\text{Phobos}} \vec{a} = G \times \frac{M_{\text{Phobos}} \times M_{\text{Mars}}}{r^2} \vec{u}_n$$

$$\text{donc } \vec{a} = \frac{G \times M_{\text{Mars}}}{r^2} \vec{u}_n.$$

$$\text{Or, } \vec{a} = \frac{v^2}{r} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t.$$

$$\text{Par identification : } a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad \text{et} \quad a_n = G \times \frac{M_{\text{Mars}}}{r^2}.$$

2. La coordonnée tangentielle de l'accélération  $a_t = \frac{dv}{dt}$  est nulle donc la valeur de la vitesse est constante : le mouvement est uniforme.

#### 3 Caractériser le vecteur accélération du centre de masse d'une planète

1.  $\vec{F}_{S/V} = G \times \frac{M_V \times M_S}{r^2} \vec{u}_n$  où  $\vec{u}_n$  est le vecteur unitaire du repère

de Frenet lié à Vénus et qui pointe vers le centre du Soleil.

2. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse V de Vénus dans le référentiel héliocentrique considéré galiléen, on a :

$$\vec{F}_{S/V} = M_V \vec{a} \quad \text{et} \quad \vec{F}_{S/V} = G \times \frac{M_V \times M_S}{r^2} \vec{u}_n ;$$

$$\text{d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_S}{r^2} \vec{u}_n.$$

Le vecteur accélération  $\vec{a}$  du centre de masse de Vénus et le vecteur unitaire  $\vec{u}_n$  sont colinéaires. Le coefficient de proportionnalité  $G \times \frac{M_S}{r^2}$  est positif ; ces deux vecteurs sont donc de même sens. Le vecteur accélération du centre de masse de Vénus a pour direction la droite passant par les centres de Vénus et du Soleil. Il est dirigé de Vénus vers le Soleil.

Il a pour valeur  $a = G \times \frac{M_S}{r^2}$  ;

$$\text{soit } a = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times \frac{1,99 \times 10^{30} \text{ kg}}{(1,08 \times 10^{11} \text{ m})^2}$$

$$a = 1,14 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

#### 4 Déterminer les caractéristiques d'une vitesse

1. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse H de Hubble dans le référentiel géocentrique considéré galiléen, on a :

$$\vec{F}_{T/H} = m_H \vec{a} \text{ et } \vec{F}_{T/H} = G \times \frac{m_H \times M_T}{r^2} \vec{u}_n ;$$

$$\text{d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_T}{r^2} \vec{u}_n, \text{ avec } r = R_T + h.$$

$$\text{On a donc } \vec{a} \begin{cases} a_n = \frac{G \times M_T}{r^2} \\ a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}.$$

2. Puisque la coordonnée normale de l'accélération est  $a_n = \frac{v^2}{r}$ , il vient :

$$G \times \frac{M_T}{r^2} = \frac{v^2}{r} \text{ ainsi } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

Le vecteur vitesse de Hubble est tangent à sa trajectoire circulaire,  $\vec{v} = v \vec{u}_t$ .

$$\text{On a donc } \vec{v} \begin{cases} v_n = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ v_t = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}} \end{cases}.$$

$$3. \text{ Soit } v = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}}{(6,37 \times 10^6 \text{ m} + 600 \times 10^3 \text{ m})}}$$

La valeur de la vitesse de Hubble dans ce référentiel est  $7,56 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### 5 Exploiter l'expression de la valeur de la vitesse d'un corps céleste

1. D'après la photographie, on a  $r_p < r_Q$ . D'après son expression littérale, la valeur  $v$  de la vitesse est inversement proportionnelle à la racine carrée du rayon  $r$  de la trajectoire circulaire.

On en déduit donc que la valeur de la vitesse de l'anneau intérieur  $v_p$  est plus grande que celle  $v_Q$  de l'anneau extérieur.

$$2. T = \frac{2\pi \times r}{v} \text{ et } v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}.$$

En combinant ces deux expressions, il vient  $T = 2\pi \times \sqrt{\frac{r^3}{G \times M_S}}$ .

Les périodes de révolution de P et Q ne peuvent pas être identiques ; comme  $r_p < r_Q$ , il vient  $T_p < T_Q$ .

#### 6 Établir la troisième loi de Kepler (1)

1. Le mouvement est circulaire uniforme, on a donc  $T = \frac{2\pi \times r}{v}$ .

$$\text{Or } v = \sqrt{\frac{G \times M_J}{r}} \text{ donc } T = 2\pi \times r \times \sqrt{\frac{r}{G \times M_J}}.$$

2. En élevant l'expression précédente au carré,  $T^2 = 4\pi^2 \times r^2 \times \frac{r}{G \times M_J}$ . On obtient :  $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_J}$ .

Le carré de la période de révolution des satellites de Jupiter est proportionnel au cube du rayon de leur orbite supposée circulaire.

3. On déduit de la relation précédente

$$4\pi^2 \times r^3 = T^2 \times G \times M_J \text{ soit } r = \sqrt[3]{\frac{T^2 \times G \times M_J}{4\pi^2}}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{(3,02 \times 10^5 \text{ s})^2 \times 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 1,90 \times 10^{27} \text{ kg}}{4\pi^2}}$$

$$r = 6,64 \times 10^8 \text{ m}.$$

#### 7 Exploiter la troisième loi de Kepler (2)

1. Dans le référentiel jupiterocentrique, le carré de la période de révolution  $T$  des satellites de Jupiter est proportionnel au cube du rayon  $r$  de leur orbite supposée circulaire.

2. On calcule, dans la même unité, le rapport  $K = \frac{T^2}{r^3}$  pour chaque satellite :

$$K_{\text{Io}} = \left(\frac{T^2}{r^3}\right)_{\text{Io}} = \frac{(1,77 \text{ jour})^2}{(4,22 \times 10^5 \text{ km})^3}$$

$$\text{et } K_{\text{Gan}} = \left(\frac{T^2}{r^3}\right)_{\text{Gan}} = \frac{(7,15 \text{ jour})^2}{(1,07 \times 10^6 \text{ km})^3}.$$

On obtient  $\frac{K_{\text{Io}}}{K_{\text{Gan}}} = 0,999$ , ce qui vérifie la loi de Kepler.

Ces satellites orbitent donc tous les deux autour de Jupiter.

## Exercices

### S'entraîner

p. 55

#### 8 Connaître les critères de réussite

##### Satellite CFOSAT

1. Soit S le centre de masse du satellite.  
2. On applique la deuxième loi de Newton au centre de masse du satellite dans le référentiel géocentrique considéré galiléen :

$$\vec{F}_{T/S} = m \vec{a} \text{ en notant } m \text{ la masse du satellite.}$$

$$\text{Or } \vec{F}_{T/S} = G \times \frac{m \times M_T}{r^2} \vec{u}_n, \text{ avec le rayon de l'orbite}$$

$$r = R_T + h \text{ (} h \text{ est l'altitude du satellite).}$$

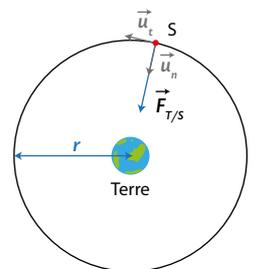
$$\text{On a } m \vec{a} = G \times \frac{m \times M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_n$$

$$\text{d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_n.$$

$$\text{On a donc } \vec{a} \begin{cases} a_n = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \\ a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$$

La coordonnée tangentielle de l'accélération  $a_t = \frac{dv}{dt}$  est nulle, donc la valeur de la vitesse de S est constante : le mouvement est uniforme dans ce référentiel.

3. La coordonnée normale de l'accélération est :  $a_n = \frac{v^2}{R_T + h}$ .



Par identification,  $\frac{v^2}{R_T + h} = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}$ , ainsi  $v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}$ .

Le vecteur vitesse  $\vec{v}$  du centre de masse du satellite est tangent à la trajectoire, orienté dans le sens du mouvement et sa valeur est  $v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}$ .

4. Le mouvement est circulaire uniforme, on a donc :

$$T = \frac{2\pi \times (R_T + h)}{v} \text{ et } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}$$

$$\text{Il vient } T = \frac{2\pi \times (R_T + h)}{\sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}}, \text{ d'où } T = 2\pi \times (R_T + h) \times \sqrt{\frac{R_T + h}{G \times M_T}}$$

$$\text{soit } T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \times M_T}}$$

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(6,4 \times 10^6 \text{ m} + 519 \times 10^3 \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}}}$$

La période de révolution de S est  $5,7 \times 10^3$  s.

## 9 À chacun son rythme Satellites d'Uranus

1. Dans le référentiel centré sur Uranus, le carré de la période  $T$  de révolution des satellites d'Uranus est proportionnel au cube du demi-grand axe  $a$  de leur orbite :  $\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$ .

Dans le cas d'une trajectoire circulaire,  $a = r$  avec  $r$  le rayon de la trajectoire circulaire du satellite autour d'Uranus. La troisième loi de Kepler se note alors  $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$ .

2.

Satellite	Miranda	Ariel	Umbriel	Titania
$T$ (j)	1,413	2,520	4,144	8,706
$r$ (km)	129 780	192 240	265 970	435 840
$\frac{T^2}{r^3}$ ( $\text{j}^2 \cdot \text{km}^{-3}$ )	$9,134 \times 10^{-16}$	$8,939 \times 10^{-16}$	$9,127 \times 10^{-16}$	$9,155 \times 10^{-16}$

3.  $\frac{T^2}{r^3}$  est quasiment une constante pour les satellites d'Uranus, donc la troisième loi de Kepler est vérifiée.

## 10 Balance cosmique

1. Dans le référentiel héliocentrique considéré galiléen, la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse d'une planète donne :

$$\vec{F}_{S/P} = m \vec{a} \text{ avec } m \text{ la masse d'une planète,}$$

$$\text{et } \vec{F}_{S/P} = G \times \frac{m \times M_S}{r^2} \vec{u}_n ; \text{ d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_S}{r^2} \vec{u}_n.$$

$$\text{On a donc } \vec{a} \begin{cases} a_n = G \times \frac{M_S}{r^2} \\ a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$$

La coordonnée normale de l'accélération  $a_n = \frac{v^2}{r}$ .

$$\text{Par identification, } \frac{v^2}{r} = G \times \frac{M_S}{r^2} \text{ ainsi } v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$$

La valeur de la vitesse d'une planète dans le référentiel héliocentrique est  $\sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$  avec  $r$  le rayon de leur trajectoire supposée circulaire.

2. La période de révolution des planètes est égale à la durée mise par ces planètes pour faire un tour complet du Soleil à la vitesse de valeur  $v$  suivant une trajectoire circulaire :  $T = \frac{2\pi \times r}{v}$ .

$$\text{Or } v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$$

$$\text{Il vient } T = \frac{2\pi \times r}{\sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}}, \text{ d'où } T = 2\pi \times r \sqrt{\frac{r}{G \times M_S}}$$

$$\text{soit } T = 2\pi \times \sqrt{\frac{r^3}{G \times M_S}}$$

3. En élevant au carré,  $T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_S}$  ; soit  $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_S}$ .

$G$  et  $M_S$  sont des constantes, donc  $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$ , ce qui vérifie la troisième loi de Kepler dans le référentiel héliocentrique.

4. À partir de  $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_S}$ , on isole  $M_S$  ; soit  $M_S = \frac{4\pi^2}{G \times T^2} \times r^3$ .

En prenant les valeurs de  $T$  et  $r$  pour Mars, il vient :

$$M_S = \frac{4\pi^2 \times (2,28 \times 10^{11} \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times (1,88 \times 3,156 \times 10^7 \text{ s})^2}$$

$$M_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

5. Pour un astre possédant des satellites et connaissant les paramètres orbitaux de ces satellites (période et demi-grand axe de l'ellipse), il est possible de déterminer la masse de l'astre attracteur. La troisième loi de Kepler joue alors le rôle de balance cosmique.

## 11 Résolution de problème

### Station spatiale internationale

1<sup>re</sup> étape : S'approprier la question posée

1. Dans quel référentiel étudier le mouvement d'un satellite de la Terre ?
2. Quel est le repère le plus adapté pour étudier le mouvement de l'ISS ?
3. Quelles sont les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération ?

2<sup>e</sup> étape : Lire et comprendre les documents

- Pour étudier le mouvement d'un satellite de la Terre, il est préférable d'utiliser le référentiel géocentrique. La deuxième loi de Newton est plus facile à utiliser dans le repère de Frenet dont l'origine est placée au centre de masse de l'ISS.
- On se place dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme, le vecteur vitesse a une valeur constante et le vecteur accélération de l'ISS sera perpendiculaire à sa trajectoire et dirigé vers le centre de la Terre.

3<sup>e</sup> étape : Dégager la problématique

Comment déterminer l'altitude de la station spatiale internationale dans le référentiel géocentrique, à partir de la deuxième loi de Newton, connaissant la valeur de sa vitesse ?

4<sup>e</sup> étape : Construire la réponse

- Définir le système, le référentiel.
- Faire l'inventaire des forces appliquées au système.
- Appliquer la deuxième loi de Newton et travailler dans le repère de Frenet.
- Établir l'expression de la valeur  $v$  de la vitesse de l'ISS.
- Extraire puis calculer l'altitude de l'ISS ; vérifier qu'elle est inférieure à 2 000 km, zone d'une orbite terrestre basse.

### 5<sup>e</sup> étape : Répondre

Le système étudié est l'ISS dans le référentiel géocentrique considéré galiléen. On souhaite déterminer l'altitude de l'ISS à partir de la deuxième loi de Newton, connaissant la valeur de sa vitesse. On suppose que l'ISS n'est soumise qu'à la force de gravitation exercée par la Terre qui a pour expression dans le repère de Frenet :

$\vec{F}_{T/ISS} = G \times \frac{m \times M_T}{r^2} \vec{u}_n$ , avec  $m$  la masse de l'ISS et  $r$  le rayon de sa trajectoire circulaire.

On applique la deuxième loi de Newton.

$$\vec{F}_{T/ISS} = m \vec{a}.$$

Il vient  $G \times \frac{m \times M_T}{r^2} \vec{u}_n = m \vec{a}$  avec  $r = R_T + h$  ;

$$\text{d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}.$$

La coordonnée normale de l'accélération a pour expression :

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{v^2}{R_T + h}.$$

On peut donc écrire :  $\frac{v^2}{R_T + h} = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}$ .

$$\text{D'où } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

On connaît la valeur  $v$  de la vitesse, on extrait de cette relation l'altitude  $h$ . Soit :

$$v^2 = \frac{G \times M_T}{R_T + h} \Leftrightarrow R_T + h = \frac{G \times M_T}{v^2}. \text{ Ainsi } h = \frac{G \times M_T}{v^2} - R_T$$

$$h = \frac{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}}{(7,66 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2} - 6,4 \times 10^6 \text{ m}.$$

$$h = 4,2 \times 10^5 \text{ m}.$$

L'altitude de l'ISS est  $4,2 \times 10^5$  m soit  $4,2 \times 10^2$  km. Cette altitude est inférieure à 2 000 km synonyme d'une orbite terre basse.

À une telle altitude, il est plutôt raisonnable de ne pas prendre en compte les forces de frottement dues à l'air de l'atmosphère terrestre.

### 12 Geostationary Satellite

**Traduction :** Arianespace a mis en orbite le CondoSat Saudi Geostationary Satellite 1/Hellas Sat 4, pour le compte des opérateurs KACST et Hellas Sat.

Ce premier lancement de l'année réalisé par Arianespace a eu lieu le mardi 5 février à 18 h 01 (heure locale de Kourou) depuis le Centre Spatial Guyanais (CSG), base de lancement européenne. Cet investissement marque la 103<sup>e</sup> mission d'Ariane 5 et porte à 374 le nombre de satellites placés en orbite géostationnaire par Arianespace.

Le CondoSat est en orbite circulaire autour de la Terre sur son plan équatorial, à une altitude  $h$ , dans le référentiel géocentrique considéré comme un référentiel galiléen.

**1.** Définir le terme géostationnaire.

**2.a.** Donner les caractéristiques de l'accélération  $\vec{a}$  et de la vitesse  $\vec{v}$  du centre de gravité du CondoSat dans le référentiel géocentrique.

**b.** Montrer que le mouvement du centre de gravité du CondoSat est uniforme.

**3.** La période de révolution du CondoSat doit être équivalente à celle de la Terre.

Justifier cette affirmation.

**4.** Déterminer l'altitude  $h$  à laquelle le CondoSat est placé en orbite géostationnaire.

### Réponses :

**1.** Un satellite géostationnaire est un satellite immobile dans un référentiel terrestre.

**2.a.** Appliquons la deuxième loi de Newton au satellite CondoSat, de masse  $m$ , dans le référentiel géocentrique :

$$\vec{F}_{T/S} = m \vec{a} \text{ avec } \vec{F}_{T/S} = G \times \frac{m \times M_T}{r^2} \vec{u}_n \text{ et } r = R_T + h.$$

$$\text{Il vient } m \vec{a} = G \times \frac{m \times M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_n \text{ d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_n.$$

Le vecteur accélération  $\vec{a}$  du centre de masse du CondoSat est perpendiculaire à sa trajectoire et dirigé vers le centre de la Terre.

$$\text{Sa valeur est } a = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}.$$

$$\text{On a donc : } \vec{a} \begin{cases} a_n = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \\ a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$$

La coordonnée normale de l'accélération est  $a_n = \frac{v^2}{r}$ ,

$$\text{avec } r = R_T + h, \text{ soit } a_n = \frac{v^2}{R_T + h}. \text{ Or } a_n = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}.$$

$$\text{Il vient } \frac{v^2}{R_T + h} = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}. \text{ Ainsi } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

Le vecteur vitesse  $\vec{v}$  du centre de masse du satellite est tangent à sa trajectoire, orienté dans le sens du mouvement et sa valeur

$$\text{est } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

**b.** La coordonnée tangentielle  $a_t = \frac{dv}{dt}$  de l'accélération du satellite est nulle, donc la valeur  $v$  de sa vitesse est constante. Le mouvement du CondoSat dans le référentiel géocentrique est uniforme.

**3.** Pour être immobile dans le référentiel terrestre, le satellite doit être immobile par rapport à un point à la surface de la Terre. Donc la période de révolution du satellite autour de la Terre doit être la même que celle d'un point de la surface de la Terre.

**4.** La période de révolution du CondoSat est égale à la durée mise par ce satellite pour faire un tour complet de trajectoire circulaire à la vitesse de valeur  $v$  :

$$T_T = \frac{2\pi \times (R_T + h)}{v} \text{ avec } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

$$\text{Il vient } T_T = \frac{2\pi \times (R_T + h)}{\sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}};$$

$$\text{d'où } T_T = 2\pi \times (R_T + h) \times \sqrt{\frac{R_T + h}{G \times M_T}}$$

$$\text{soit } T_T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \times M_T}}.$$

On extrait  $h$  de cette expression :

$$T_T^2 = 4\pi^2 \times \frac{(R_T + h)^3}{G \times M_T} \text{ d'où } (R_T + h)^3 = \frac{T_T^2 \times G \times M_T}{4\pi^2}$$

$$R_T + h = \sqrt[3]{\frac{T_T^2 \times G \times M_T}{4\pi^2}} \text{ et } h = \sqrt[3]{\frac{T_T^2 \times G \times M_T}{4\pi^2}} - R_T$$

Avec  $T_T = (23 \times 3\,600 + 56 \times 60 + 4)$  s, on obtient  $h = 3,6 \times 10^7$  m. Le CondoSat se situe à une altitude de  $3,6 \times 10^7$  m.

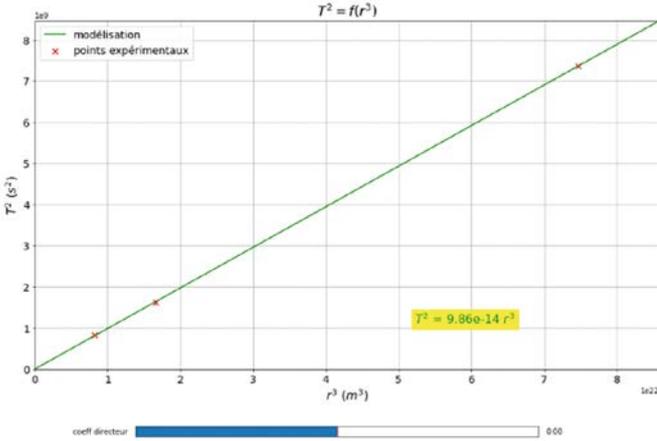
**13** Python

**Des satellites artificiels...**

**Ressources pour le professeur à télécharger :**

- Fichier Python
- Explications du programme en langage Python

- 1.a.** Les points sont alignés et la droite qui les modélise semble passer par l'origine.  
**b.** La ligne 33 permet de réaliser la modélisation mathématique de la courbe  $T^2 = f(r^3)$ .  
**c.** La valeur affectée par défaut au coefficient directeur de cette modélisation est indiquée à la ligne 35 :  $\text{init\_a} = 6.00\text{e-}14$ . Elle est égale à  $6,00 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ .  
**2.** En ajustant au mieux le curseur, on obtient :  $a = 9,86 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ .



**3.** La courbe représentative de la fonction  $T^2 = f(r^3)$  est une droite passant par l'origine d'équation :  $T^2 = k \times r^3$ .

On a bien  $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$  qui exprime la troisième loi de Kepler.

**4.** La troisième loi de Kepler s'écrit dans l'approximation des orbites circulaires :

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_T} = a. \text{ On extrait } M_T = \frac{4\pi^2}{G \times a}.$$

$$M_T = \frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 9,86 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}}$$

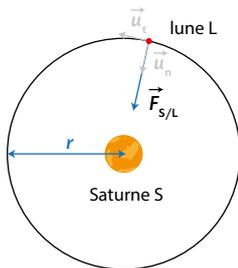
La masse de la Terre est  $6,00 \times 10^{24} \text{ kg}$ .

**Vers le Bac**

**Préparation à l'écrit**

**14** Les lunes de Saturne

**1.a.** et **b.** Voir schéma ci-dessous.



**c.**  $\vec{F}_{S/L} = G \times \frac{m \times M_S}{r^2} \vec{u}_n$ .

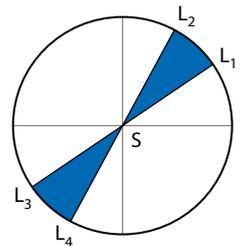
**2.** Dans le référentiel saturnocentrique, la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse de la lune donne :  $\vec{F}_{S/L} = m \vec{a}$ .

Or  $\vec{F}_{S/L} = G \times \frac{m \times M_S}{r^2} \vec{u}_n$ , d'où  $\vec{a} = G \times \frac{M_S}{r^2} \vec{u}_n$ .

**3.a.** On a donc  $\vec{a} \begin{cases} a_n = G \times \frac{M_S}{r^2} \\ a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$ .

La coordonnée tangentielle de l'accélération  $a_t = \frac{dv}{dt}$  est nulle, donc la valeur de la vitesse de la lune est constante : le mouvement est uniforme dans ce référentiel.

**b.** D'après la deuxième loi de Kepler, le segment de droite SL, reliant les centres de Saturne et de sa lune, balaie des aires égales pendant des durées égales. Lorsque la trajectoire est circulaire, les distances parcourues ( $L_1, L_2$ ) et ( $L_3, L_4$ ) pendant une même durée sont égales.



**4.** La coordonnée normale de  $\vec{a}$  est :

$$a_n = \frac{v^2}{r}.$$

Par identification,  $G \times \frac{M_S}{r^2} = \frac{v^2}{r}$  d'où  $v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$ .

Le vecteur vitesse  $\vec{v}$  du centre de masse de la lune est tangent à la trajectoire, orienté dans le sens du mouvement et sa valeur

est  $v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$ .

**5.a.** La période de révolution de la lune est égale à la durée mise par ce satellite pour faire un tour complet de Saturne à la vitesse de valeur  $v$  suivant une trajectoire circulaire :  $T = \frac{2\pi \times r}{v}$ .

Il vient  $T = 2\pi \times r \times \sqrt{\frac{r}{G \times M_S}}$ .

La période de révolution de cette lune s'exprime par :

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{r^3}{G \times M_S}}.$$

b. On isole  $M_S$  :  $T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_S}$  ; donc  $M_S = \frac{4\pi^2}{G \times T^2} \times r^3$

$$M_S = \frac{4\pi^2 \times (2,29 \times 10^{10} \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times (3,54 \times 3,156 \times 10^7 \text{ s})^2}$$

La masse de Saturne est  $5,69 \times 10^{26} \text{ kg}$ .

6. Si Métis est une lune de Saturne on a :  $\frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3} = \frac{T_L^2}{r_L^3}$ .

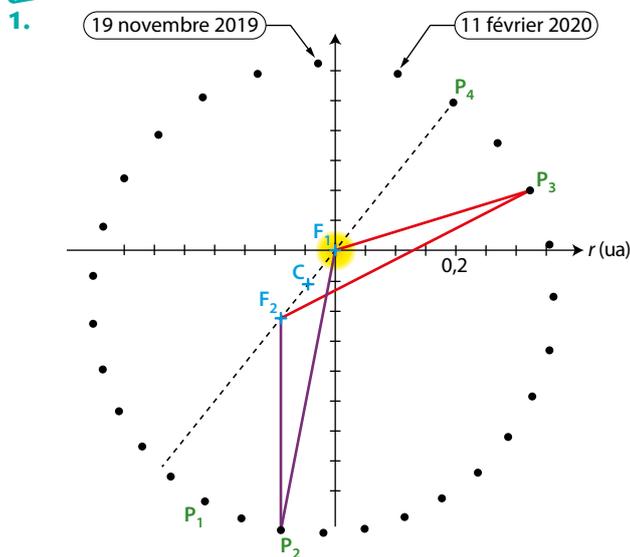
On calcule  $\frac{T_L^2}{r_L^3}$  et  $\frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3}$ .

$$\frac{T_L^2}{r_L^3} = \frac{(3,54 \times 3,156 \times 10^7 \text{ s})^2}{(2,29 \times 10^{10} \text{ m})^3} = 1,04 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3} = \frac{(0,295 \times 24 \times 3600 \text{ s})^2}{(1,28 \times 10^8 \text{ m})^3} = 3,10 \times 10^{-16} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\frac{T_L^2}{r_L^3} \neq \frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3} \text{ donc Métis n'est pas une lune de Saturne.}$$

### 15 Vérification des trois lois de Kepler



Le Soleil est positionné en  $F_1$ , un des foyers du grand axe  $2a$ .  $F_2$  est le symétrique de  $F_1$  par rapport au centre  $C$ , milieu du grand axe.

On détermine le rapport  $k_i = \frac{PF_{i1} + PF_{i2}}{2a}$  pour les quatre positions repérées :

$P_i$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$k_i$	1,02	1,02	1,04	1,00

On a, aux erreurs de mesure près,  $MF_1 + MF_2 = 2a$ . D'après le doc. **D**, la trajectoire de Mercure dans le référentiel héliocentrique est elliptique.

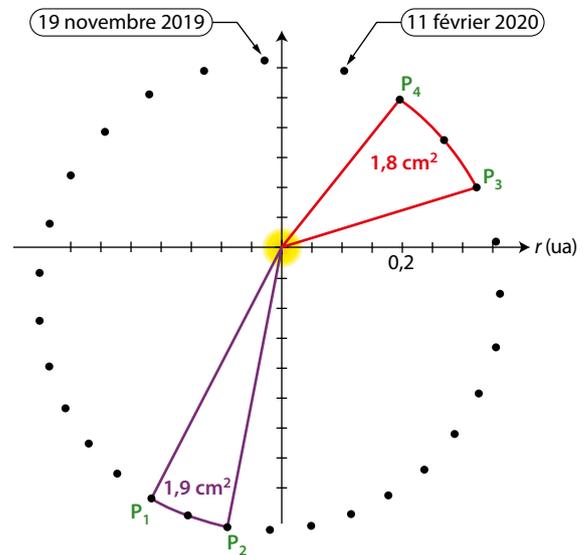
2. a. et b. Voir la figure ci-après.

L'aire d'un secteur de l'ellipse peut en première approche se calculer comme l'aire d'un triangle dont on mesure la base et la hauteur, sachant que :

$$\mathcal{A} = \frac{\text{base} \times \text{hauteur}}{2}$$

On a  $\mathcal{A}_1 = \frac{P_1P_2 \times SP_1}{2}$  et  $\mathcal{A}_2 = \frac{P_3P_4 \times SP_4}{2}$ .

On trouve ici  $\mathcal{A}_1 = 1,9 \text{ cm}^2$  et  $\mathcal{A}_2 = 1,8 \text{ cm}^2$ .



c. Les aires parcourues en des durées égales (6 jours) sont égales (aux erreurs de mesure près). La deuxième loi de Kepler est donc vérifiée.

3. a. La courbe représentative de la fonction  $T^2 = f(r^3)$  est une droite passant par l'origine du repère d'équation :  $T^2 = K \times r^3$  avec  $K = \text{constante}$ .

On a bien  $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$ . La troisième loi de Kepler est donc vérifiée.

b. Pour les objets célestes du système solaire :

$$\frac{T^2}{r^3} = K \text{ avec } K = 3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \times \text{m}^{-3} \text{ (coefficient directeur).}$$

On isole  $r$  :  $r = \sqrt[3]{\frac{T^2}{K}}$ .

Pour Cérès,  $T = 4,5 \text{ ans}$ , soit  $1,4 \times 10^8 \text{ s}$ .

$$\text{D'où } r = \sqrt[3]{\frac{(1,4 \times 10^8 \text{ s})^2}{3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}}}$$

Le rayon de l'orbite de Cérès autour du Soleil est  $4,0 \times 10^{11} \text{ m}$ .

# 4

## Premier principe de la thermodynamique et bilan énergétique

### Programme officiel

#### L'énergie : conversions et transferts

Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique	
Énergie interne d'un système. Aspects microscopiques.	Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.
Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.	Prévoir le sens d'un transfert thermique. Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.
Capacité thermique d'un système incompressible. Énergie interne d'un système incompressible.	Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique. <i>Procéder à l'étude énergétique d'un système thermodynamique.</i>

### Activité 1

#### expérimentale Premier principe de la thermodynamique ..... p. 60

#### Capacités exigibles

- Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.
- Mettre en œuvre un dispositif pour réaliser un bilan énergétique et suivre l'évolution de la température d'un système.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation d'appareils électriques.

#### Matériel :

- Calorimètre.
- Conducteur ohmique chauffant.
- Agitateur.
- Chronomètre.
- Capteur de température.
- Ampèremètre.
- Voltmètre.
- Balance.
- Source de tension continue.
- Pissette d'eau.

#### Pratique expérimentale

##### 1 Exemple de proposition de protocole expérimental :

- On tare le calorimètre, puis on y introduit directement, à l'aide d'une éprouvette graduée, 200 g d'eau.
- On plonge le conducteur ohmique chauffant dans l'eau.
- On mesure et note la température initiale  $\theta_i$ .
- On branche en série l'ampèremètre et le conducteur ohmique chauffant à la source de tension continue de f.e.m. 6,0 V ; on place un voltmètre en dérivation aux bornes du conducteur ohmique.
- Simultanément, on allume le circuit électrique permettant de chauffer l'eau et l'on déclenche le chronomètre. On note les tension  $U$  et intensité  $I$  électriques.

• On suit l'évolution de la température en agitant. Lorsque  $\theta_f = \theta_i + 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , on stoppe le chronomètre et on détermine la durée de chauffage  $\Delta t$ .

• D'après les données  $W_{\text{elec}} = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t = U \times I \times \Delta t$ , on peut alors déterminer le travail électrique qui a permis l'élévation de la température de l'eau de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2 • La température du système {eau et calorimètre} a augmenté car l'agitation thermique des entités a augmenté. On en déduit que de l'énergie microscopique cinétique a été reçue par le système.

• L'énergie potentielle d'interactions entre entités qui constituent le système ne varie pas, car le système ne subit pas de transformations physiques (changement d'état) ni de transformations chimique ou nucléaire.

3 a. D'après le premier principe de la thermodynamique pour le conducteur ohmique :  $\Delta U_1 = W_{\text{elec}} + Q_1$ .

De plus, il est indiqué que toute l'énergie reçue par travail électrique  $W_{\text{elec}}$  par le conducteur ohmique est restituée sous forme de transfert thermique  $Q_1$  ; soit  $W_{\text{elec}} = -Q_1$ .

Le premier principe de la thermodynamique pour le conducteur ohmique devient :  $\Delta U_1 = W_{\text{elec}} + Q_1 = 0$ .

b. D'après le premier principe de la thermodynamique pour le système {eau et calorimètre} :  $\Delta U_2 = Q_2 + W_2$ .

Or le système reçoit de l'énergie uniquement par transfert thermique  $Q_2$  cédé par le conducteur ohmique, et n'en transfère pas à l'extérieur car le calorimètre est thermiquement isolé.

Donc  $W_2 = 0$  et  $Q_2 = -Q_1$  ; ainsi  $\Delta U_2 = -Q_1$  soit  $\Delta U_2 = W_{\text{elec}}$  ou  $\Delta U_2 = U \times I \times \Delta t$ .

**Exemple de résultats expérimentaux obtenus pour une élévation de température de  $4,3 \text{ }^\circ\text{C}$  :**

$U = 6,01 \text{ V}$ ,  $I = 1,63 \text{ A}$ ,  $\theta_i = 24,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta_f = 29 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $\Delta t = 7 \text{ min } 14 \text{ s}$  soit  $434 \text{ s}$  ;  $\Delta U_2 = 6,0 \text{ V} \times 1,61 \text{ A} \times 434 \text{ s} = 4,25 \times 10^3 \text{ J}$ .

4 La durée de chauffage est proportionnelle à la masse d'eau à chauffer et à son élévation de température dans une bouilloire ; soit  $\Delta t = k \times m \times \Delta \theta$ .

Avec la bouilloire décrite de puissance  $\mathcal{P}_e = 1\,200\text{ W}$  : si  $m_1 = 200\text{ g}$  et  $\Delta \theta_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , la notice indique  $\Delta t_1 = 30\text{ s}$ .

Soit  $\Delta t_1 = k \times m_1 \times \Delta \theta_1$  (1).

Avec la même bouilloire si  $m_2 = 400\text{ g}$  et  $\Delta \theta_2 = 30\text{ }^\circ\text{C}$ , on obtient de même  $\Delta t_2 = k \times m_2 \times \Delta \theta_2$  (2).

En isolant  $k$  dans la relation (1) et en le remplaçant dans la relation (2), on obtient la durée maximale de chauffage recherchée :

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \times \frac{m_2 \times \Delta \theta_2}{m_1 \times \Delta \theta_1} ; \Delta t_2 = 30\text{ s} \times \frac{0,400\text{ kg} \times 30\text{ }^\circ\text{C}}{0,200\text{ kg} \times 20\text{ }^\circ\text{C}}$$

soit  $\Delta t_2 = 90\text{ s}$ .

### Un pas vers le cours

5 La variation d'énergie interne  $\Delta U$  d'un système, qui n'échange pas de matière avec l'extérieur, au repos macroscopique, et qui évolue d'un état initial  $i$  à un état final  $f$ , est égale à la somme des énergies échangées par le système avec l'extérieur par travail  $W$  et/ou par transfert thermique  $Q$  :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$$

$\Delta U$  en J       $W$  en J       $Q$  en J

Le premier principe de la thermodynamique permet d'établir un bilan d'énergie du système.

## Activité 2

expérimentale



Tâche complexe

Variation d'énergie interne d'un système incompressible..... p. 61

### Capacités exigibles

- Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.
- Mettre en œuvre un dispositif pour réaliser un bilan énergétique et suivre l'évolution de la température d'un système.

### Investigation

#### 1 Étapes de la démarche de résolution

1<sup>re</sup> étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

- La capacité à absorber de l'énergie du liquide de refroidissement est élevée mais inférieure à celle de l'eau.
- La capacité thermique massique  $c$  d'un système est l'énergie absorbée par 1 kg de ce système pour se réchauffer de 1 °C.
- La méthode des mélanges dans un calorimètre entre un corps chaud et un liquide froid permet de déterminer la capacité thermique de l'un des deux.
- La capacité thermique massique du cuivre est connue.
- À l'intérieur d'un calorimètre les transferts thermiques se compensent.
- On dispose d'un calorimètre, d'un cylindre de cuivre, d'eau, d'un liquide de refroidissement et de thermomètres.

2<sup>e</sup> étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de justifier que l'eau a une capacité thermique massique supérieure à celle du liquide de refroidissement du scooter de la photographie.

3<sup>e</sup> étape : Émettre des hypothèses permettant d'y répondre

L'eau a une capacité thermique massique supérieure à celle du liquide de refroidissement proposé, puisqu'il est dit que l'eau est un meilleur liquide de refroidissement que le liquide proposé.

4<sup>e</sup> étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

- Liste du matériel** : calorimètre ; agitateur ; cylindre de cuivre ; capteur de température ; balance ; potence ; liquide de refroidissement ; pissette d'eau ; éprouvette graduée ; bécher ; cylindre de cuivre ; ficelle ; bain thermostaté.
  - Protocole expérimental** : il doit permettre de déterminer les capacités thermiques massiques de l'eau et du liquide de refroidissement proposé, pour les comparer.
- Pour cela, on utilisera la méthode des mélanges dans un calorimètre entre un corps chaud, le cylindre de cuivre, et un corps froid, successivement le liquide proposé puis l'eau.

#### Exemple de proposition de protocole expérimental :

- Peser le cylindre en cuivre  $m_{\text{Cu}}$ .
- Dans le bain thermostaté d'eau chaude réglé à  $\theta_c = 80\text{ }^\circ\text{C}$ , chauffer une grande quantité d'eau et y immerger l'échantillon en cuivre suspendu par la ficelle à la potence.
- Peser dans un calorimètre préalablement taré, une masse connue,  $m$ , d'eau (liquide étudié) à température ambiante.
- Lorsque la température de l'eau dans le calorimètre se stabilise, mesurer et noter la température initiale  $\theta_i$ .
- Lorsque la température du bain thermostaté est stabilisée, prélever rapidement le cylindre de cuivre et le placer dans le calorimètre contenant l'eau étudiée.
- Agiter en suivant l'évolution de la température avec le thermomètre et noter la température finale la plus haute atteinte  $\theta_f$ .
- Reproduire ce protocole en remplaçant l'eau par le liquide de refroidissement à étudier. Bien essuyer le calorimètre entre les deux expériences.
- Calculer  $c_{\text{liquide}}$ .

5<sup>e</sup> étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

Pour le système {cuivre, calorimètre et liquide étudié}, d'après le premier principe de la thermodynamique :  $\Delta U = Q + W$ .

Le système n'échange aucune énergie par travail avec l'extérieur, ni par transfert thermique car le calorimètre est thermiquement isolé. Donc  $\Delta U = Q + W = 0$ .

$$\text{De plus, } \Delta U = \Delta U_{\text{cal}} + \Delta U_{\text{liquide}} + \Delta U_{\text{cuivre}} ;$$

$$\text{donc } \Delta U_{\text{cal}} + \Delta U_{\text{liquide}} + \Delta U_{\text{cuivre}} = 0.$$

D'après le complément :

$$\Delta U_{\text{cal}} = C \times (\theta_f - \theta_i) ;$$

$$\Delta U_{\text{liquide}} = m_{\text{liquide}} \times c_{\text{liquide}} \times (\theta_f - \theta_i) ;$$

$$\Delta U_{\text{cuivre}} = m_{\text{cuivre}} \times c_{\text{cuivre}} \times (\theta_f - \theta_c) ;$$

$$\text{soit } C \times (\theta_f - \theta_i) + m_{\text{liquide}} \times c_{\text{liquide}} \times (\theta_f - \theta_i) + m_{\text{cuivre}} \times c_{\text{cuivre}} \times (\theta_f - \theta_c) = 0.$$

On en déduit :

$$c_{\text{liquide}} = \frac{m_{\text{cuivre}} \times c_{\text{cuivre}} \times (\theta_c - \theta_f) - C \times (\theta_f - \theta_i)}{m_{\text{liquide}} \times (\theta_f - \theta_i)}.$$

#### Exemple de résultats expérimentaux :

- la capacité thermique massique du cuivre est connue  $c_{\text{Cu}} = 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  ;
- la capacité thermique du calorimètre utilisé est :  $C = 160\text{ J} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  ;
- la température du bain thermostaté est fixée à :  $\theta_c = 80\text{ }^\circ\text{C}$  ;
- deux séries de mesures sont proposées ci-après.

## Première série

Étude de l'eau
$\theta_i = 22,5\text{ }^\circ\text{C}$ , $\theta_f = 24,6\text{ }^\circ\text{C}$ ; $m_{\text{eau}} = 200\text{ g}$ ; $m_{\text{cuivre}} = 100\text{ g}$ .

$c_{\text{eau}} = \frac{100 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (80\text{ }^\circ\text{C} - 24,6\text{ }^\circ\text{C}) - 160\text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (24,6\text{ }^\circ\text{C} - 22,5\text{ }^\circ\text{C})}{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times (24,6\text{ }^\circ\text{C} - 22,5\text{ }^\circ\text{C})}$ soit $c_{\text{eau}} = 4,3 \times 10^3\text{ J}$ .
Étude du liquide de refroidissement
$\theta_i = 22,5\text{ }^\circ\text{C}$ , $\theta_f = 28,7\text{ }^\circ\text{C}$ ; $m_{\text{liquide}} = 200\text{ g}$ ; $m_{\text{cuivre}} = 100\text{ g}$ .
$c_{\text{liquide}} = \frac{100 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (80\text{ }^\circ\text{C} - 25,2\text{ }^\circ\text{C}) - 160\text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (25,2\text{ }^\circ\text{C} - 22,5\text{ }^\circ\text{C})}{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times (25,2\text{ }^\circ\text{C} - 22,5\text{ }^\circ\text{C})}$ soit $c_{\text{liquide}} = 3,1 \times 10^3\text{ J}$ .

## Deuxième série

Étude de l'eau
$\theta_i = 24,5\text{ }^\circ\text{C}$ , $\theta_f = 28,5\text{ }^\circ\text{C}$ ; $m_{\text{eau}} = 200\text{ g}$ ; $m_{\text{cuivre}} = 200\text{ g}$ .
$c_{\text{eau}} = \frac{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (80\text{ }^\circ\text{C} - 28,5\text{ }^\circ\text{C}) - 160\text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (28,5\text{ }^\circ\text{C} - 24,5\text{ }^\circ\text{C})}{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times (28,5\text{ }^\circ\text{C} - 24,5\text{ }^\circ\text{C})}$ soit $c_{\text{eau}} = 4,2 \times 10^3\text{ J}$ .
Étude du liquide de refroidissement
$\theta_i = 24,5\text{ }^\circ\text{C}$ , $\theta_f = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ; $m_{\text{liquide}} = 200\text{ g}$ ; $m_{\text{cuivre}} = 200\text{ g}$ .
$c_{\text{liquide}} = \frac{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (80\text{ }^\circ\text{C} - 29,7\text{ }^\circ\text{C}) - 160\text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (29,7\text{ }^\circ\text{C} - 24,5\text{ }^\circ\text{C})}{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times (29,7\text{ }^\circ\text{C} - 24,5\text{ }^\circ\text{C})}$ soit $c_{\text{liquide}} = 3,2 \times 10^3\text{ J}$ .

On note que :

- la capacité thermique de l'eau est supérieure à celle du liquide de refroidissement ;
- l'hypothèse précédente est donc correcte.

### Données supplémentaires

- Le liquide de refroidissement est composé de 60 % environ d'eau et 40 % d'éthylène glycol :  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ .
- La capacité calorifique massique de l'éthylène-glycol :  
 $c = 2,21 \times 10^3\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ .
- La capacité thermique massique de l'eau est :  
 $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ .

### Un pas vers le cours

- 2** La variation d'énergie interne d'un système incompressible dépend de :
- sa capacité thermique massique ;
  - la variation de température entre son état initial et final ;
  - sa masse.

### Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

- Dans cette activité, il faut utiliser le premier principe vu à l'activité 1, qui pourra être fourni à l'élève.
- De même, les indications sur la masse de liquide à prélever et la température du bain thermostaté devront être fournies à l'élève. La capacité thermique du calorimètre sera fournie, elle dépend, entre autres, de la hauteur de liquide contenu dans le vase calorimétrique.**
- On peut également choisir de confier l'étude d'un seul liquide par groupe, pour permettre de répéter la mesure ; puis, une comparaison entre groupes des capacités thermiques massiques obtenues des deux liquides.

## Proposition de grille d'évaluation par compétence :

Compétences	Capacités attendues	A	B	C	D
<b>S'approprier</b>	Comprendre que la capacité à refroidir d'un liquide est liée à sa capacité thermique massique.				
<b>Analyser-Raisonner</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Choisir de mesurer la capacité thermique massique de l'eau puis celle du liquide de refroidissement.</li> <li>– Repérer la valeur des transferts thermiques Q dans un calorimètre.</li> <li>– Identifier à l'aide des documents les expressions de la variation d'énergie interne, du calorimètre, du liquide, du cylindre de cuivre.</li> <li>– Appliquer le premier principe de la thermodynamique au système {cuivre, calorimètre et liquide étudié} pour exprimer la capacité thermique inconnue en fonction des autres données connues.</li> <li>– Identifier les grandeurs expérimentales à mesurer : <math>\theta_i, \theta_f, m_{\text{cuivre}}, m_{\text{liquide}}, \theta_c</math>.</li> <li>– Comparer la capacité thermique massique de l'eau puis du liquide de refroidissement.</li> </ul>				
<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Peser l'échantillon de cuivre, la masse de liquide en tarant la balance.</li> <li>– Fixer la température du bain thermostaté à <math>\theta_c</math> choisie.</li> <li>– Immerger l'échantillon de cuivre de façon à pouvoir le sortir aisément.</li> <li>– Attendre l'équilibre thermique lors des différentes étapes.</li> <li>– Relever avec soin les différentes températures en utilisant le même thermomètre.</li> <li>– Calculer la capacité thermique massique de l'eau et du liquide de refroidissement.</li> </ul>				
<b>Valider</b>	Conclure par la validation ou non des hypothèses formulées.				

### Capsule vidéo de cours : Du premier principe au bilan d'énergie

#### QCM

p. 65

1. A ; 2. B ; 3. A, B et C ; 4. A ; 5. A ; 6. A ; 7. B ; 8. A ; 9. A ; 10. C.

#### Exercices

#### Appliquer le cours

p. 68

#### 3 Définir l'énergie interne

1. Le système d'étude est la plaquette de freins. Tout ce qui est externe à la plaquette (disque et air ambiant) constitue le milieu extérieur.

2. L'énergie interne de la plaquette est composée de l'énergie cinétique microscopique d'agitation thermique des particules la constituant et de l'énergie potentielle microscopique d'interaction qui existent entre ces particules.

#### 4 Citer les différentes contributions à l'énergie interne

Lorsqu'un solide cristallin au repos macroscopique s'échauffe, son énergie cinétique microscopique augmente, car l'agitation thermique des atomes du réseau augmente. Son énergie potentielle microscopique d'interactions peut être considérée comme constante (ou en très faible augmentation). En effet, dans le réseau cristallin, des atomes vont se rapprocher, d'autres vont s'éloigner (vibrations des atomes autour de leurs positions d'équilibre). Ainsi, l'énergie interne, somme des énergies microscopiques, augmente.

L'affirmation est correcte.

#### 5 Connaître l'énergie microscopique (1)

L'énergie potentielle microscopique de l'eau est modifiée.

L'énergie cinétique microscopique de l'eau reste constante.

#### 6 Connaître l'énergie microscopique (2)

1. Les pattes de l'ours polaire en contact avec l'iceberg se refroidissent localement ; l'agitation thermique des entités qui les constituent diminue ; donc l'énergie cinétique microscopique des pattes de l'ours diminue.

2. Si la glace est fondante, l'énergie potentielle microscopique d'interaction de l'iceberg, liée au changement d'état, est modifiée puisque qu'il y a fusion.

#### 7 Distinguer des variations d'énergie (1)

1. La valeur de la vitesse de la météorite atteint une vitesse limite à cause des interactions avec l'atmosphère. La valeur de la vitesse reste alors constante, donc l'énergie cinétique macroscopique,  $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m v^2$ , de la météorite reste constante.

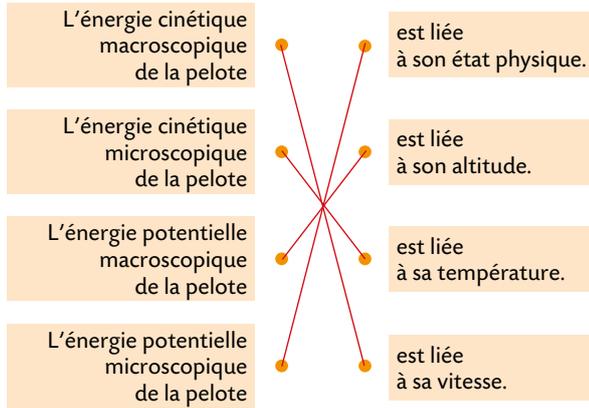
L'énergie potentielle d'interaction avec la Terre (macroscopique),  $\mathcal{E}_p = -G \times \frac{m_{\text{météorite}} \times M_T}{r}$ , diminue car la distance,  $r$ , entre la Terre et la météorite diminue. On en déduit que l'énergie mécanique  $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p$  diminue.

2. La météorite possède de l'énergie mécanique macroscopique mais également des énergies microscopiques dont la somme est son énergie interne.

L'énergie cinétique microscopique de la météorite liée à l'agitation thermique a augmenté car celle-ci s'échauffe.

L'énergie potentielle microscopique d'interaction, liée au changement d'état, est également modifiée car la météorite fond en pénétrant dans l'atmosphère.

## 8 Distinguer des variations d'énergie (2)



## 9 Reconnaître le mode de transfert de l'énergie (1)

1. Le transfert d'énergie de la piste sur les skis s'effectue par travail,  $W$ , des forces de frottement exercées par la piste sur les skis.
2. Le travail des forces de frottement est résistant  $W < 0$  ; de l'énergie est perdue par le système {ski} et reçue par la piste. Donc le sens du transfert est du système vers la piste.

## 10 Reconnaître le mode de transfert de l'énergie (2)

1. Voir ci-contre.
2. L'eau liquide, plus chaude que le glaçon, cède de l'énergie par transfert thermique au glaçon.
3. Le système {glaçon} reçoit un transfert thermique, donc  $Q > 0$ .



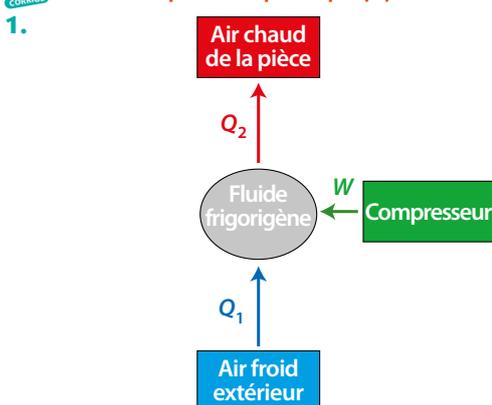
## 11 Connaître le premier principe

1.  $\Delta U_{i \rightarrow f}$  correspond à la variation d'énergie interne du système ;  $W$  est l'énergie échangée par travail entre le système et l'extérieur ;  $Q$  est l'énergie échangée par transfert thermique entre le système et l'extérieur.
2. Par convention, le travail et le transfert thermique sont comptés :
  - positivement s'ils sont reçus par le système ;
  - négativement s'ils sont cédés par le système.

## 12 Énoncer le premier principe

1. Le système {eau et théière} reçoit un transfert thermique  $Q_1$  de la part de la plaque chauffante mais cède aussi un transfert thermique  $Q_2$  à l'air ambiant (la température de surface du métal est plus élevée que celle de l'air ambiant).
2. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système {eau et théière}, la variation d'énergie interne  $\Delta U = Q + W$  est égale à la somme de toutes les énergies transférées par travail  $W$  et par transfert thermique  $Q$ .  
Or, il n'y a pas de transfert d'énergie par travail. Donc :  $\Delta U = Q_1 + Q_2$ .  
Remarque :  $Q_1 > 0$  car le système reçoit effectivement de l'énergie de la part de la plaque chauffante ;  $Q_2 < 0$  car le système cède effectivement de l'énergie à l'air ambiant.

## 13 Utiliser le premier principe (1)



2. Pour le fluide frigorigène, le premier principe de la thermodynamique s'écrit :  $\Delta U = W + Q_1 + Q_2$ .

## 14 Utiliser le premier principe (2)

1. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système {shaker, jus de citron vert et jus d'orange}, entre l'état initial (introduction des ingrédients) et l'état final (fin du mélange),  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$ .

Or, le shaker est un récipient qui ne permet pas d'échange d'énergie avec l'extérieur ni par transfert thermique ( $Q = 0$ ) ni par travail ( $W = 0$ ) ; d'où :  $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$ .

Remarque : des transferts thermiques, dont la somme est nulle, s'effectuent en revanche à l'intérieur du shaker entre les différents ingrédients.

2. La température du verre est celle de l'air extérieur. Le système {shaker, jus de citron vert et jus d'orange}, en équilibre thermique après mélange, est plus froid que le verre dans lequel il est placé. Le système reçoit donc de l'énergie sous forme d'un transfert thermique  $Q$  de la part du verre : le système se réchauffe.

## 15 Prévoir l'évolution d'une énergie interne

1. L'expression de la variation d'énergie interne du système {jus de fruit}, de l'état initial  $i$  à l'état final  $f$ , est :  $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$ .
2. Comme le jus d'orange refroidit de  $5^\circ\text{C}$ ,  $\theta_f - \theta_i < 0$  et donc  $\Delta U_{i \rightarrow f} < 0$ .

## 16 Calculer une variation d'énergie interne

1. L'expression de la variation d'énergie interne du système {eau}, de l'état initial  $i$  à l'état final  $f$ , est :  $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i)$ .
2. On déduit de l'expression précédente :

$$\theta_f = \frac{\Delta U_{i \rightarrow f}}{m \times c_{\text{eau}}} + \theta_i ;$$

$$\text{soit } \theta_f = \frac{4,21 \times 10^4 \text{ J}}{150 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}} + 20^\circ\text{C} ,$$

$$\text{soit } \theta_f = 87^\circ\text{C} .$$

## Exercices

### S'entraîner

p. 70

## 17 Aluminium, toujours !

1. a. La température du système 1 {pièce d'alliage} augmente lorsqu'il vient au contact de l'eau plus chaude. Donc la forme d'énergie du système 1 qui est modifiée est son énergie cinétique microscopique liée à l'agitation thermique des entités qui constituent l'alliage.

b. Pour le système 1 :

- état initial : début de la trempe, le système 1 est à la température  $\theta_1$ .

- état final : fin de la trempe, le système 1 est à la température  $\theta_f$ .

- l'expression de la variation d'énergie interne du système 1, incompressible, de l'état initial  $i$  à l'état final  $f$ , est :  $\Delta U_1 = m \times c \times (\theta_f - \theta_1)$ .

De même, pour le système 2 {eau du bain} :

- état initial : début de la trempe, le système 2 est à la température  $\theta_2$ .

- état final : fin de la trempe, le système 2 est à la température  $\theta_f$ .

- l'expression de la variation d'énergie interne du système 2, incompressible, de l'état initial  $i$  à l'état final  $f$ , est :

$$\Delta U_2 = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_2) .$$

2. a. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système, entre l'état initial et l'état final,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$ .

Or le système 1 reçoit de l'énergie du milieu extérieur (l'eau du bain) exclusivement par transfert thermique  $Q_1$ . Donc le transfert par travail  $W = 0$  d'où  $\Delta U_1 = Q_1$ .

De plus, le système 2 cède de l'énergie au milieu extérieur (pièce d'alliage) exclusivement par transfert thermique  $Q_2$ ; donc  $W = 0$  d'où  $\Delta U_2 = Q_2$ .

**b.** Les seuls échanges ont lieu entre le système 1 et le système 2; d'où  $Q_2 = -Q_1$  donc  $\Delta U_1 = -\Delta U_2$  (ou le système 1+2 [pièce d'alliage, eau du bain] n'échange aucune énergie ni par transfert thermique ni par travail. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système 1 + 2, entre l'état initial et l'état final,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$  avec  $\Delta U_{i \rightarrow f} = \Delta U_1 + \Delta U_2$  soit  $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$  donc  $\Delta U_1 = -\Delta U_2$ )

**3.** D'après la question précédente  $\Delta U_1 = -\Delta U_2$ , ainsi  $m \times c \times (\theta_f - \theta_1) = -m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_1)$ .

On développe l'expression :

$$m \times c \times \theta_f - m \times c \times \theta_1 = -m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_f + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2$$

puis en factorisant par  $\theta_f$  :

$$\theta_f \times (m \times c + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}}) = m \times c \times \theta_1 + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2.$$

$$\text{Ainsi : } \theta_f = \frac{m \times c \times \theta_1 + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2}{(m \times c + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}})}.$$

D'où :

$$\theta_f = \frac{10 \text{ kg} \times 909 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times 540 \text{ °C} + 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times 19 \text{ °C}}{1,0 \times 10^3 \text{ kg} \times 909 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}}$$

soit  $\theta_f = 17 \text{ °C}$ .

### 18 Il y a film et film...

**1. a.** Le système {cuve et cire} passe d'un état initial à la température ambiante  $\theta_a$  à un état final à la température de fusion de la cire  $\theta_f$ . La variation d'énergie interne de ce système incompressible est :

$$\Delta U_1 = m_1 \times c_{\text{cire}} \times (\theta_f - \theta_a) + m_0 \times c_{\text{Al}} \times (\theta_f - \theta_a)$$

$$\text{Soit } \Delta U_1 = (m_1 \times c_{\text{cire}} + m_0 \times c_{\text{Al}}) \times (\theta_f - \theta_a).$$

$$\text{Ainsi } \Delta U_1 = (0,100 \text{ kg} \times 3,4 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + 0,250 \text{ kg} \times 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) \times (64 \text{ °C} - 19 \text{ °C})$$

$$\text{soit } \Delta U_1 = 2,5 \times 10^4 \text{ J}.$$

**b.** Lors du chauffage, la température de la cire augmente l'agitation thermique des entités qui constituent la cire augmente; donc l'énergie cinétique microscopique du système augmente. En revanche, la cire ne fond pas, l'énergie potentielle microscopique d'interaction liée au changement d'état ne varie pas.

**2. a.** D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système, entre l'état initial et l'état final,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$ .

Le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur, (le conducteur ohmique) exclusivement par transfert thermique  $Q_1$ ; et le transfert d'énergie par travail  $W = 0$ . De plus, on néglige les transferts thermiques entre le système et l'air ambiant; d'où  $\Delta U_1 = Q_1$ .

**b.** D'après les questions précédentes,  $Q_1 = 2,5 \times 10^4 \text{ J}$  est positive.

**c.** Le conducteur ohmique restitue intégralement sous forme de transfert thermique l'énergie reçue par travail électrique, d'où  $Q_1 = W_{\text{élec}}$ ; or  $W_{\text{élec}} = \mathcal{P} \times \Delta t_1$  soit  $\Delta U_1 = \mathcal{P} \times \Delta t_1$ .

$$\text{On en déduit } \Delta t_1 = \frac{\Delta U_1}{\mathcal{P}}, \text{ soit } \Delta t_1 = \frac{2,5 \times 10^4 \text{ J}}{200 \text{ W}};$$

$$\Delta t_1 = 1,3 \times 10^2 \text{ s}.$$

**3.** De même, le transfert thermique pour qu'une fusion totale de la cire se produise est :

$$Q_2 = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t_2 \text{ d'où } Q_2 = 200 \text{ W} \times 6 \text{ min} \times 60 \text{ s} \cdot \text{min}^{-1};$$

$$\text{soit } Q_2 = 7,2 \times 10^4 \text{ J}.$$

**4.** Pour la fusion de la cire, au total :

$$Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 \text{ d'où } Q_{\text{tot}} = 2,5 \times 10^4 \text{ J} + 7,2 \times 10^4 \text{ J};$$

$$\text{soit } Q_{\text{tot}} = 9,7 \times 10^4 \text{ J}.$$

### 19 Chacun son rythme

#### Info ou intox ?

**1.** Pour le système {eau contenue dans le ballon} :

– état initial : température  $\theta_i$  ;

– état final : température finale  $\theta_f$  ;

– la variation d'énergie interne du système, incompressible, de l'état initial  $i$  à l'état final  $f$ , est :

$$\Delta U_1 = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i);$$

$$\text{soit } \Delta U_1 = \rho \times V \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i).$$

$$\text{D'où } \Delta U_1 = 1 \text{ 000 kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 80 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (65,0 \text{ °C} - 17,0 \text{ °C})$$

$$\Delta U_1 = 1,6 \times 10^7 \text{ J}.$$

**2.** D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système, entre l'état initial et l'état final,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$ .

Or le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur, le conducteur ohmique, exclusivement par transfert thermique  $Q_1$ ; donc le transfert d'énergie par travail est nul :  $W = 0$ . De plus, on néglige toute perte thermique, donc les transferts thermiques autres que ceux existant entre le système et l'extérieur sont nuls; d'où  $\Delta U_1 = Q_1$ .

**3.** Le conducteur ohmique restitue intégralement par transfert thermique  $Q_1$  l'énergie reçue par travail électrique; d'où :

$$Q_1 = W_{\text{élec}}; \text{ or } W_{\text{élec}} = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t_1 \text{ donc } Q_1 = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t_1.$$

**4.** De la relation  $\Delta U_1 = Q_1$  on déduit :

$$\Delta U_1 = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t_1 \text{ soit } \Delta t_1 = \frac{\Delta U_1}{\mathcal{P}_{\text{élec}}}$$

$$\text{d'où } \Delta t_1 = \frac{1,6 \times 10^7 \text{ J}}{1 \text{ 500 W}} \text{ soit } \Delta t_1 = 1,1 \times 10^4 \text{ s}.$$

**5.**  $\Delta t_1$  est d'environ 3 heures : la durée de chauffe annoncée par le constructeur est correcte.

### 20 Résolution de problème

#### Pompe à chaleur

**1<sup>re</sup> étape : S'approprier la question posée.**

**1.** Quelle grandeur citée peut être reliée à une durée par une relation simple ?

**2.** Quelle grandeur citée peut être reliée à une température par une relation simple ?

**3.** En quoi la durée de fonctionnement de la PAC impacte-t-elle la température de l'air de la pièce ?

**4.** Y-a-t-il un lien entre le coefficient de performance et le travail électrique consommé par la PAC ?

**2<sup>e</sup> étape : Lire et comprendre les documents**

- On apprend qu'une PAC fournit un transfert thermique à l'air de la pièce et qu'elle comprend un compresseur qui nécessite un travail électrique.

- Le coefficient de performance de la PAC relie le transfert thermique  $Q$  et le travail électrique nécessaire.

- On apprend que l'air est considéré comme un gaz incompressible.

- On apprend que la puissance électrique de la PAC est 750 W dans le mode chauffage étudié.

**3<sup>e</sup> étape : Dégager la problématique**

Quelle est la durée de fonctionnement de la PAC nécessaire pour que la température dans la pièce atteigne  $\theta_f = 19 \text{ °C}$  ?

**4<sup>e</sup> étape : Construire la réponse**

- Utiliser la relation entre la puissance et le travail électrique pour exprimer la durée de fonctionnement de la PAC.

- Utiliser la définition du COP pour exprimer le travail électrique par une nouvelle relation.

- Utiliser la relation entre la variation de l'énergie interne d'un fluide incompressible et sa variation de température, entre un état initial et un état final.

- Écrire le premier principe de la thermodynamique pour l'air de la pièce d'habitation afin de relier le transfert thermique  $Q$  reçu par l'air de la pièce et sa variation d'énergie interne  $\Delta U$ .

- Combiner les différentes relations obtenues pour isoler la durée recherchée en fonction de grandeurs dont les valeurs sont données : COP, températures, capacité thermique massique de l'air, volume d'air, masse volumique de l'air.

## 5<sup>e</sup> étape : Répondre

### • Présenter le contexte et introduire la problématique.

Un particulier veut connaître la durée au bout de laquelle la pompe à chaleur, qu'il souhaite acheter, aura transféré à l'air de la pièce l'énergie nécessaire pour que la température de l'air atteigne la température de confort fixée à 19 °C. Il faut donc trouver une relation qui relie l'intervalle de temps, inconnu, et la variation de température de l'air, connue.

### • Mettre en forme la réponse.

Le travail électrique consommé pendant la durée  $\Delta t$  par le compresseur de la PAC est lié à la puissance électrique :  $W_{\text{élec}} = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t$ . D'après la définition du COP, l'énergie absorbée par le système {air de la pièce}, par transfert thermique est  $Q = \text{COP} \times W_{\text{élec}}$ .

On en déduit  $Q = \text{COP} \times \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t$  et donc  $\Delta t = \frac{Q}{\text{COP} \times \mathcal{P}_{\text{élec}}}$ .

Recherchons donc  $Q$  : d'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système {air de la pièce}, entre l'état initial et l'état final,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$ . Or, le système reçoit de l'énergie de la PAC (milieu extérieur), exclusivement par transfert thermique  $Q$ . Donc le transfert d'énergie par travail est nul :  $W = 0$ . D'où  $\Delta U = Q$ . Soit le système {air de la pièce} :

- état initial : température ambiante  $\theta_i$  ;
- état final : température finale  $\theta_f$  ;
- la variation d'énergie interne du système, incompressible, de l'état initial 1 à l'état final f, est :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = m_{\text{air}} \times c_{\text{air}} \times (\theta_f - \theta_i) \text{ avec } m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \times V_{\text{air}}$$

$$\text{d'où } \Delta U_{i \rightarrow f} = \rho_{\text{air}} \times V \times c_{\text{air}} \times (\theta_f - \theta_i).$$

Puisque  $Q = \Delta U_{i \rightarrow f}$ , on en déduit :

$$Q = \rho_{\text{air}} \times V \times c_{\text{air}} \times (\theta_f - \theta_i).$$

La relation  $\Delta t = \frac{Q}{\text{COP} \times \mathcal{P}_{\text{élec}}}$  devient alors :

$$\Delta t = \frac{\rho_{\text{air}} \times V \times c_{\text{air}} \times (\theta_f - \theta_i)}{\text{COP} \times \mathcal{P}_{\text{élec}}}$$

On calcule :

$$\Delta t = \frac{1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 100 \text{ m}^3 \times 1,004 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (19,0 \text{ °C} - 15,0 \text{ °C})}{4 \times 750 \text{ W}}$$

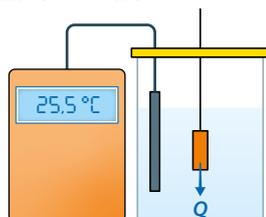
soit  $\Delta t = 1,6 \times 10^2 \text{ s}$ .

### • Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

La durée de fonctionnement de la PAC pour chauffer la pièce à la température souhaitée de confort est de  $1,6 \times 10^2 \text{ s}$ , soit moins de 3 minutes. Cette durée semble courte. Elle est en fait sous-estimée car le transfert thermique nécessaire est forcément supérieur du fait des murs, plancher et plafond de la pièce qu'il faudrait également prendre en compte ; l'air considéré comme incompressible entraîne également une approximation.

## 21 Musique !

### 1. Schéma de la situation initiale :



### 2. Pour le sous-système 1 {calorimètre et eau} :

- état initial : température ambiante  $\theta_i$  ;
- état final : température finale  $\theta_f$  ;
- la variation d'énergie interne du sous-système 1, incompressible, de l'état initial 1 à l'état final f, est :

$$\Delta U_1 = m_1 \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i) + C \times (\theta_f - \theta_i)$$

$$\text{soit } \Delta U_1 = (m_1 \times c_{\text{eau}} + C) \times (\theta_f - \theta_i)$$

$$\text{soit } \Delta U_1 = (0,300 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + 225 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}) \times (19,9 \text{ °C} - 18,0 \text{ °C})$$

$$\Delta U_1 = 2,81 \times 10^3 \text{ J}$$

### 3. Pour le sous-système 2 {laiton} :

- état initial : température ambiante  $\theta_2$  ;
- état final : température finale  $\theta_f$  ;
- la variation d'énergie interne du sous-système 2, incompressible, de l'état initial 2 à l'état final f, est :  $\Delta U_2 = m_2 \times c_2 \times (\theta_f - \theta_2)$ .

4. a. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système 1 + 2, {calorimètre, eau et laiton}, entre l'état initial et l'état final,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$ .

De plus, on néglige les transferts thermiques entre le système et l'air ambiant ; donc le système n'échange pas d'énergie avec l'extérieur ni par transfert thermique donc  $Q = 0$ , ni par travail  $W = 0$  ; d'où  $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$  avec  $\Delta U_{i \rightarrow f} = \Delta U_1 + \Delta U_2$ .

D'où  $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$ .

b. D'après les résultats précédents,  $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$  s'écrit :

$$\Delta U_1 + m_2 \times c_2 \times (\theta_f - \theta_2) = 0 ;$$

$$\text{d'où } c_2 = -\frac{\Delta U_1}{m_2 \times (\theta_f - \theta_2)} = -\frac{(m_1 \times c_{\text{eau}} + C) \times (\theta_f - \theta_i)}{m_2 \times (\theta_f - \theta_2)} ;$$

$$c_2 = -\frac{(0,300 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + 225 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}) \times (19,9 \text{ °C} - 18,0 \text{ °C})}{0,100 \text{ kg} \times (19,9 \text{ °C} - 92,0 \text{ °C})}$$

$$\text{soit } c_2 = 3,9 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}.$$

5. a. Pour la fabrication d'instrument, on recherche du laiton ayant un pourcentage massique de 80 % en cuivre et 20 % en zinc. D'après le document, la valeur de  $c_2 = 3,90 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$  est associée à un échantillon ayant un pourcentage massique de 70 % en cuivre et 30 % en zinc ; cet échantillon n'est donc pas utilisable pour réaliser un instrument de musique.

b. Il existe des incertitudes sur les mesures des masses et des températures. Particulièrement sur la température initiale du laiton  $\theta_2$ , qui peut varier en réalité, le temps d'être placé dans le calorimètre et qui influe également sur la température  $\theta_f$ . L'expérience nécessiterait d'être répétée pour gagner en fiabilité et une évaluation, par la méthode de type A, de l'incertitude-type serait possible.

## 22 First law of thermodynamics

Traduction : Aux environs de 1850, Rudolf Clausius et William Thomson (Kelvin) élaborèrent tous deux la première loi de la thermodynamique.

Cette loi est basée sur le principe de conservation de l'énergie d'un système où la chaleur et le travail sont les modes de transfert d'énergie pour ce système en équilibre thermique.

1. Énoncer le premier principe de la thermodynamique.
2. Indiquer les conventions de signe utilisées dans ce principe.

### Réponses :

1. Le premier principe de la thermodynamique énonce que la variation  $\Delta U$  d'énergie interne d'un système, qui n'échange pas de matière avec l'extérieur, au repos macroscopique, et qui évolue d'un état initial i à un état final f, est égale à la somme des énergies échangées par le système avec l'extérieur, par travail  $W$  et/ou par transfert thermique  $Q$  :

$$\Delta U \text{ en J} \quad \Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q \quad \leftarrow \begin{array}{l} Q \text{ en J} \\ W \text{ en J} \end{array}$$

2. Par convention, le travail et le transfert thermique sont comptés :
  - positivement s'ils sont reçus par le système ;
  - négativement s'ils sont cédés par le système.

## 23 Aluminothermie et soudure de rails

1. La variation d'énergie du système est :

$$\Delta U_1 = m \times c \times (\theta_c - \theta_a) \text{ soit :}$$

$$\Delta U_1 = 1,0 \text{ kg} \times 712 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (1\,200 \text{ °C} - 20 \text{ °C})$$

$$\Delta U_1 = 8,4 \times 10^5 \text{ J}$$

- 2. a.** D'après le premier principe de la thermodynamique :  
 $\Delta U_1 = Q_1 + W_1$ .  
 Dans ce cas, il n'y a pas d'apport d'énergie par travail, donc  $W_1 = 0 \text{ J}$ .  
 Ainsi  $\Delta U_1 = Q_1$ .
- b.** D'après la question précédente,  $Q_1 = 8,4 \times 10^5 \text{ J}$ .
- 3.** L'énergie massique libérée par la réaction  $\mathcal{E}_{\text{lib}} = 3,9 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ . Le mélange de poudre a une masse de  $1,0 \text{ kg}$  soit  $1,0 \times 10^3 \text{ g}$ .

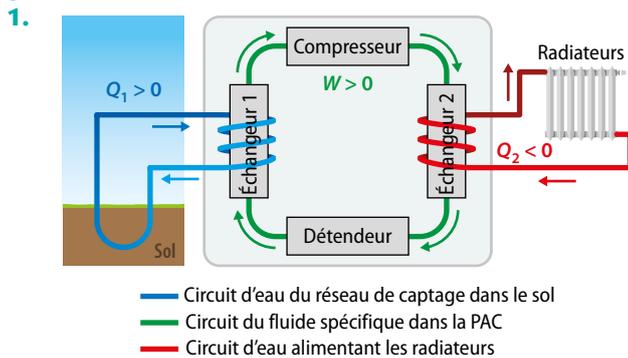
Ainsi  $Q_2 = m \times \mathcal{E}_{\text{lib}}$ .  
 $Q_2 = 1,0 \times 10^3 \text{ g} \times 3,9 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} = 3,9 \times 10^6 \text{ J}$ .

- 4. a.** On constate que  $Q_1 < Q_2$ .
- b.** L'énergie libérée  $Q_2$  par la réaction chimique permet d'atteindre la température de fusion du fer  $\theta_{\text{fus,Fe}}$  et de celle  $\theta_{\text{fus,acier}}$  de l'acier des rails ; le soudage pourra alors s'effectuer par coulée de métal dans le moule situé entre les deux rails.

## Vers le Bac

### Préparation à l'écrit

#### 24 Géothermie



- 2. a.** Pour le système {eau des radiateurs} :
- état initial : température ambiante  $\theta_i$  ;
  - état final : température finale  $\theta_f$  ;
  - la variation d'énergie interne du sous-système 2, incompressible, de l'état initial  $i$  à l'état final  $f$ , est :  
 $\Delta U_2 = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i)$  avec  $m_{\text{eau}} = D_m \times \Delta t$  où  $D_m$  est le débit massique ; soit  $\Delta U_2 = D_m \times \Delta t \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i)$ .  
 D'où  $\Delta U_2 = 145 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 4 \text{ h} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (20 \text{ °C} - 12 \text{ °C})$  soit  $\Delta U_2 = 2 \times 10^7 \text{ J}$ .

- b.** D'après le premier principe appliqué à l'eau des radiateurs,  $\Delta U_2 = Q_{\text{reçue par l'eau}} > 0$  car  $W = 0$  et le seul transfert d'énergie reçu par l'eau des radiateurs est un transfert thermique de la part du fluide spécifique ; le fluide spécifique cède donc à l'eau des radiateurs :  $Q_2 = -Q_{\text{reçue par l'eau}}$  soit  $Q_2 = -\Delta U_2$  ; donc  $Q_2 = -2 \times 10^7 \text{ J}$ .

On considère que le fluide est un système fermé (il entre la même quantité de fluide qu'il n'en sort au niveau de l'échangeur 2).

- 3. a.** D'après le premier principe de la thermodynamique pour le système {fluide spécifique} entre l'état initial et l'état final,  $\Delta U_{\text{fluide}} = Q + W$ .

Or, le système {fluide spécifique} au repos macroscopique reçoit un travail électrique  $W_{\text{elec}} > 0$ , reçoit un transfert thermique  $Q_1 > 0$ , et cède un transfert thermique  $Q_2 < 0$ . D'où  $\Delta U_{\text{fluide}} = W_{\text{elec}} + Q_1 + Q_2$

- b.** Puisque l'état initial est identique à l'état final au cours d'un cycle :  $\Delta U_{\text{fluide}} = 0 \text{ J}$ , donc  $W_{\text{elec}} + Q_1 + Q_2 = 0$  soit  $Q_1 = -Q_2 - W_{\text{elec}}$ .

Ainsi  $Q_1 = 145 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 4 \text{ h} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (20 \text{ °C} - 12 \text{ °C}) - 4,82 \times 10^6 \text{ J}$

soit environ  $Q_1 = 1 \times 10^7 \text{ J}$ .

- 4.** L'énergie utile donnée à l'eau est  $-Q_2$  et l'énergie facturée est le travail électrique indispensable au fonctionnement du compresseur, donc le rapport est  $\frac{-Q_2}{W_{\text{elec}}}$  avec :

$$\frac{-Q_2}{W_{\text{elec}}} = \frac{145 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 4 \text{ h} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (20 \text{ °C} - 12 \text{ °C})}{4,82 \times 10^6 \text{ J}}$$

soit  $\frac{-Q_2}{W_{\text{elec}}} = 4$ .

La PAC restitue quatre fois plus d'énergie par transfert thermique qu'elle ne consomme de travail électrique.

#### 25 Étude d'un dispositif de chauffe

- 1. a.** La variation d'énergie interne du système {crème encapsulée}, incompressible, de l'état initial  $i$  (température ambiante  $\theta_i$ ) à l'état final  $f$  (température finale  $\theta_f = \theta_i + \Delta\theta$ ), est :  $\Delta U_1 = \rho \times V \times c \times \Delta\theta$  avec  $m_{\text{système}} = \rho \times V$ .

- b.** Lors du chauffage, l'énergie cinétique microscopique des entités constituant la crème augmente puisqu'elle se réchauffe.

- 2.** D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système entre l'état initial et l'état final,  $\Delta U_1 = Q + W$ .

Or le système dont l'énergie mécanique ne varie pas, ne reçoit aucune énergie par travail  $W = 0 \text{ J}$  mais reçoit par transfert thermique. Les pertes sont négligées. D'où  $\Delta U_1 = Q_1$ .

On en déduit d'après **1. a.** le transfert thermique  $Q_1$  à apporter au système par le dispositif de chauffe pour atteindre la température  $\theta_f$  :  $Q_1 = \rho \times V \times c \times \Delta\theta$ .

Le conducteur ohmique restitue intégralement l'énergie qu'il reçoit par travail électrique  $W_{\text{elec}}$  sous forme de transfert thermique au système,  $Q_1 = W_{\text{elec}}$ . L'énergie électrique consommée pendant la durée  $\Delta t_1$  par le conducteur ohmique est liée à la puissance électrique :  $W_{\text{elec}} = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t_1$ .

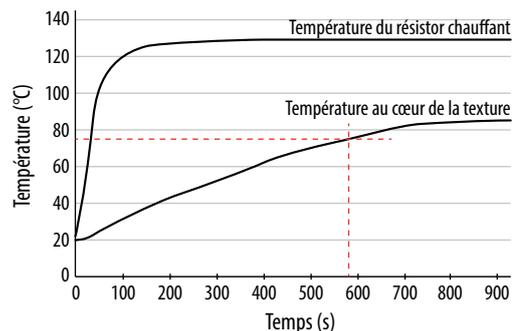
Soit  $Q_1 = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t_1$  d'où  $\rho \times V \times c \times \Delta\theta = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t_1$ .

La durée  $\Delta t_1$  du chauffage nécessaire pour réaliser ce transfert thermique est donc  $\Delta t_1 = \frac{\rho \times V \times c \times \Delta\theta}{\mathcal{P}_{\text{elec}}}$

$$\Delta t_1 = \frac{1\,200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 12,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 1\,400 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (75 \text{ °C} - 20 \text{ °C})}{15 \text{ W}}$$

$\Delta t_1 = 77 \text{ s}$  soit 1 min 17 s.

- 3.** La durée de chauffage expérimentale  $\Delta t_{1,\text{exp}}$  nécessaire pour que la texture atteigne la température  $\theta_f = 75 \text{ °C}$ , est déterminée graphiquement :  $\Delta t_{1,\text{exp}} = 580 \text{ s}$  soit 9,7 min.



- 4.** L'écart entre les durées de chauffage mesurée et calculée peut s'expliquer par le transfert thermique perdu vers le milieu extérieur mais également le transfert thermique pour chauffer l'intérieur de l'enveloppe de la capsule. La température au cœur de la capsule n'est pas celle au bord de la capsule donc il faut chauffer plus longtemps pour que le transfert thermique se propage par convection et conduction de la surface du conducteur ohmique chauffant vers le cœur de la crème.

- 5.** La durée maximale de chauffe indiquée dans le cahier des charges ne doit pas dépasser 7 minutes. La start-up ne peut donc pas conserver ce dispositif de chauffage en l'état car  $\Delta t_{1,\text{exp}} > 7 \text{ min}$ .

# 5

# Transferts thermiques

## Programme officiel

### L'énergie : conversions et transferts

#### 2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique

Notions et contenus	Capacités exigibles
	<i>Activités expérimentales support de la formation</i>
Modes de transfert thermique.	Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : convection, conduction, rayonnement.
Flux thermique. Résistance thermique.	Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.
Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat.	Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps. <i>Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.</i> <b>Capacité mathématique :</b> Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.

#### Commentaire sur la notation utilisée dans le chapitre

Les puissances sont notées en majuscules ( $\mathcal{P}$ ). Les puissances surfaciques sont notées en minuscules ( $p$ ). Les grandeurs  $\theta(t)$  et  $T(t)$  dépendant du temps sont notées par commodité d'écriture  $\theta$  et  $T$ .

## Activité 1

### expérimentale



Tâche complexe

### Résistance thermique de conduction d'un matériau ..... p. 76

#### Capacité exigible

- Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.

#### Investigation

##### 1 Étapes de la démarche de résolution :

**1<sup>re</sup> étape :** Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

- Pour identifier les paramètres ayant une influence sur l'efficacité d'un bouclier thermique, il est nécessaire de déterminer la résistance thermique du matériau.
- La résistance thermique  $R_{th}$  caractérise l'opposition d'un milieu au transfert thermique entre deux points.
- La résistance thermique  $R_{th}$  entre deux points A et B est égale au rapport de l'écart de température entre ces deux points ( $\theta_A - \theta_B$ ) et du flux thermique  $\Phi$ .
- Le flux thermique  $\Phi$  est égal au rapport du transfert thermique  $Q$  et de sa durée  $\Delta t$ .
- On dispose d'un appareil de mesure de la résistance thermique et de plusieurs échantillons de matériaux.

**2<sup>e</sup> étape :** Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

De quels paramètres la résistance thermique et donc l'efficacité d'un matériau d'isolation dépend-elle ?

##### 3<sup>e</sup> étape : Émettre des hypothèses permettant d'y répondre

La résistance thermique d'un matériau varierait avec sa nature et augmenterait avec son épaisseur (un de ses paramètres géométriques).

##### 4<sup>e</sup> étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

**Liste du matériel :** appareil de mesure du flux thermique et de la résistance thermique, plusieurs échantillons de matériaux.

##### Protocole :

- Choisir différents échantillons de matériaux de surface identique  $S$  adaptée à l'appareil.
- À l'aide d'un pied à coulisse, déterminer l'épaisseur de chacun des échantillons si elle n'est pas indiquée.
- Mesurer la résistance thermique de chaque échantillon.

**Remarque :** Certains appareils déterminent seulement le flux thermique traversant l'échantillon.

Dans ce cas, relever la valeur du flux affiché et noter l'écart de température  $\theta_A - \theta_B$  ; il est ici imposé par l'appareil : 10 °C.

$$\text{Calculer } R_{th} = \frac{(\theta_A - \theta_B)}{\Phi}.$$

##### 5<sup>e</sup> étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

Exemple de résultats avec l'appareil résistance thermique :

Matériau	Épaisseur (mm)	$R_{th}$ ( $K \cdot W^{-1}$ )
Polystyrène choc	5,0	16,2
Contreplaqué	5,0	20,0
Verre	5,2	3,7
Polystyrène	3,6	84,0
	7,7	166,1
Laine	1,8	18,0
	4,7	39,1

On observe que la résistance thermique du matériau dépend de sa nature et augmente avec son épaisseur.

Les deux hypothèses précédentes sont donc correctes.

**Remarque :** À la différence de la résistance thermique, la conductivité thermique ne dépend que du matériau aux incertitudes près.

Matériau	Épaisseur (mm)	$\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
Polystyrène choc	5,0	0,11
Contreplaqué	5,0	0,087
Verre	5,2	0,51
Polystyrène	3,6	0,015
	7,7	0,017
Laine	1,8	0,036
	4,7	0,044

### Proposition de grille d'évaluation par compétence :

Compétences	Capacités attendues	A	B	C	D
<b>S'approprier</b>	Comprendre que l'efficacité du bouclier est liée à la résistance thermique du matériau.				
<b>Analyser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Choisir différents échantillons de différents matériaux.</li> <li>– Choisir de mesurer la résistance thermique de chacun d'eux.</li> <li>– Comparer la résistance thermique des échantillons de matériaux dont un seul paramètre varie.</li> <li>– Établir l'évolution de la résistance thermique de conduction en fonction d'un premier paramètre.</li> <li>– Établir l'évolution de la résistance thermique de conduction en fonction d'un autre paramètre.</li> </ul>				
<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Déterminer l'épaisseur de chacun des échantillons si elle n'est pas indiquée.</li> <li>– Mesurer la résistance thermique des échantillons de matériaux.</li> </ul>				
<b>Valider</b>	Conclure par la validation ou non des hypothèses formulées.				

## Activité 2

### expérimentale Température d'un système incompressible au cours du temps ..... p. 77

#### Capacités exigibles

- Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.
- Mettre en œuvre un dispositif pour suivre l'évolution de la température d'un système.

#### Pratique expérimentale

**1** Exemple de protocole permettant de mesurer la température du système {eau et bécher} à intervalle de temps régulier :

- Faire chauffer de l'eau dans la bouilloire.
- Remplir d'eau chaude un bécher de 250 mL.
- Placer une sonde de température reliée à une centrale d'acquisition pour laquelle on sélectionne un « pas » d'échantillonnage, dans le bécher.
- Attendre que la température initiale  $\theta_i$  s'uniformise, la noter et lancer l'acquisition des mesures.

**2** Représentation graphique de l'évolution de la température en fonction du temps (voir ci-dessous).

**3 a.** L'équation de la courbe tracée à la question **2** peut être modélisée par une fonction :

On en déduit que l'efficacité du bouclier thermique dépend entre autres de la nature et de l'épaisseur du matériau qui le constitue.

**2** Il serait quasiment possible de poser la main sans se brûler sur la face du bouclier thermique opposée à la face chauffée à 1 200 °C, car la brique a une grande résistance thermique qui limite le transfert thermique vers la main.

#### Un pas vers le cours

**3** Connaissant le flux thermique  $\Phi$  orienté du point A vers le point B et la différence de température  $\theta_A - \theta_B$  entre ces points, la résistance thermique  $R_{th}$  du (ou des) milieu(x) traversé(s) est :

$$R_{th} = \frac{(\theta_A - \theta_B)}{\Phi} \text{ avec } R_{th} \text{ en } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \text{ ou en } \text{K} \cdot \text{W}^{-1}; \Phi \text{ en W et}$$

$\theta_A - \theta_B$  en °C ou en K.

$\theta = Ae^{axt} + B$ , avec  $A = (\theta_i - \theta_e)$  et  $B = \theta_e$ ;  $\theta_i$  étant la température initiale du système.

Soit  $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{axt} + \theta_e$ .

**b.** On en déduit  $\frac{d\theta}{dt} = a \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{axt}$ .

Si  $\theta$  vérifie l'équation différentielle :  $\frac{d\theta}{dt} = a \times \theta - a \times \theta_e$ ,

alors on obtient en explicitant chaque membre de l'équation différentielle :

$$a \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{axt} = a \times (\theta - \theta_e) \\ = a \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{axt}.$$

On vérifie que  $\theta = (\theta_i - \theta_e)e^{axt} + \theta_e$  est bien une solution de l'équation différentielle.

**4** Pour le système incompressible {café et tasse},

$$\theta - \theta_e = (\theta_i - \theta_e)e^{axt}, \text{ donc } e^{axt} = \frac{\theta - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

$$\text{soit encore } t = \frac{1}{a} \times \ln\left(\frac{\theta - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right).$$

$$t = \frac{1}{-0,20 \text{ min}^{-1}} \times \ln\left(\frac{65 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}}{85 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}}\right) = 2,0 \text{ min.}$$

La durée au bout de laquelle le café peut être dégusté est d'environ 2 minutes.

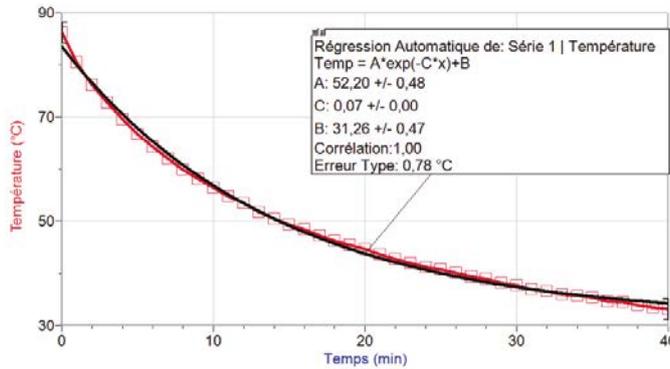
Dans la réalité, la durée est plus courte à cause des transferts thermiques par rayonnement.

**Remarque :** Si le béccher est remplacé par une tasse en faïence épaisse, assez bon isolant thermique, il ne reste quasiment plus que le transfert thermique ayant lieu au-dessus du liquide.

### Un pas vers le cours

5 La fonction mathématique qui modélise l'évolution de la température d'un système incompressible en fonction du temps est une fonction exponentielle.

Série 1	
Temps (min)	Temp (°C)
0	88,2
1	80,5
2	76,1
3	72,8
4	69,5
5	66,7
6	64,3
7	62,0
8	59,9
9	58,1
10	56,4
11	54,8
12	53,5
13	51,8
14	50,5
15	49,4
16	48,5
17	47,2
18	46,2
19	45,4
20	44,6
21	43,7
22	42,8
23	42,0
24	41,2
25	40,8



Capsule vidéo de cours : Loi de Newton

### QCM

1. A ; 2. A ; 3. A et C ; 4. A ; 5. B et C ; 6. B ; 7. A ; 8. C ; 9. C ; 10. B.

p. 81

### Exercices

### Appliquer le cours

p. 84

#### 2 Identifier le mode de transfert thermique (1)

1. et 2. On construit un tableau :

Transfert thermique entre...	Mode de transfert thermique principal	Signe du transfert thermique pour le système {eau}
L'eau et le Soleil	Rayonnement	Positif
L'eau et le sable	Conduction	Positif
L'eau et l'air	Convection	Positif

#### 3 Identifier le mode de transfert thermique (2)

Le mode de transfert thermique principal est le rayonnement.

#### 4 Déterminer un flux thermique

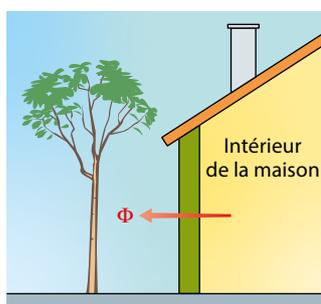
1. La température extérieure est supérieure à celle de l'habitacle du véhicule. Le transfert thermique a donc lieu depuis l'extérieur vers l'intérieur de la voiture.

2. On calcule le flux thermique :

$$\Phi = \frac{\theta_A - \theta_B}{R_{th}} = \frac{40 \text{ °C} - 22 \text{ °C}}{3,0 \times 10^{-3} \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}} = 6,0 \times 10^3 \text{ W.}$$

#### 5 Déterminer une résistance thermique

1. Le schéma de la situation est le suivant :



$$2. R_{th} = \frac{\theta_i - \theta_e}{\Phi} = \frac{19 \text{ °C} - 10 \text{ °C}}{30 \text{ W}} = 3,0 \times 10^{-1} \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}.$$

#### 6 Comprendre la loi de Newton

S représente la surface d'échange entre le système incompressible et son environnement constitué d'un fluide ; h est le coefficient d'échange convectif ;  $T_e$  est la température extérieure loin de la surface S du système et T est la température uniforme à la surface S. h est exprimé en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  ; le flux est exprimé en watt (W).

#### 7 Exploiter la loi de Newton

On utilise la loi de Newton :

$$\begin{aligned} \Phi &= h \times S \times (T_e - T) \\ &= 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \times 1,0 \text{ m}^2 \times (293 \text{ K} - 323 \text{ K}) \\ &= -3,0 \times 10^2 \text{ W.} \end{aligned}$$

Le système perd de l'énergie. Le flux thermique à travers la paroi est dirigé du système vers l'extérieur.

#### 8 Effectuer un bilan d'énergie (1)

1. Sur une durée courte, on peut considérer le flux  $\Phi$  comme constant. On peut donc écrire :  $Q = \Phi \times \Delta t$ .

Ainsi, d'après la loi de Newton :  $Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t$ .

2. Le transfert thermique peut s'exprimer par :  $Q = m \times c \times \Delta \theta$ .

3. En égalisant les deux expressions trouvées précédemment, il vient :

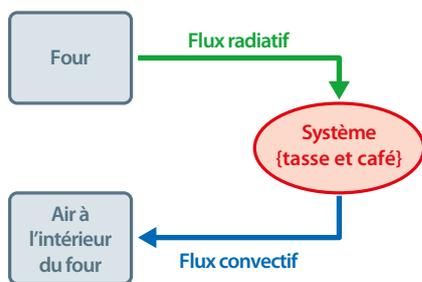
$$h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t = m \times c \times \Delta \theta \text{ soit } \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta).$$

La limite quand  $\Delta t$  tend vers zéro de  $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$  est la dérivée de  $\theta$  par rapport au temps, notée  $\frac{d\theta}{dt}$ . On en déduit l'équation différentielle

$$\text{vérifiée par } \theta : \frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e.$$

## 9 Effectuer un bilan d'énergie (2)

### 1. Schématisation de la situation



On néglige le flux renvoyé (diffusé et réémis) par le système et le flux rayonné par l'air ambiant à la température  $T_e$ .

2. C'est l'air environnant qui échange par transfert convectif avec le système {tasse et café}.

3. Le système reçoit de l'énergie par rayonnement donc  $Q_{\text{rayonnement}} > 0 \text{ J}$ .

La température du système devient supérieure à la température de l'air ambiant, donc de l'énergie est perdue par le système par transfert thermique convectif avec l'air extérieur. Ainsi  $Q_{\text{convection}} < 0 \text{ J}$ . Par application du premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U = W + Q = Q_{\text{rayonnement}} + Q_{\text{convection}} \text{ avec } W = 0 \text{ J}.$$

Le système se réchauffe. Son énergie interne augmente et  $\Delta U$  est positif.

$$\text{On en déduit } Q_{\text{rayonnement}} > |Q_{\text{convection}}|.$$

$$\text{Enfin, } \Phi_{\text{rayonnement}} > |\Phi_{\text{convection}}|.$$

## 10 Côté maths

### Résoudre une équation différentielle

1. Pour une équation différentielle de la forme :

$$y' = ay + b, \text{ les solutions sont de la forme : } y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}.$$

Par comparaison, les solutions de l'équation différentielle sont de la forme :  $\theta = K \times e^{ax} + \theta_e$ .

$$\text{D'après les conditions initiales : } \theta(0) = K + \theta_e = \theta_i$$

$$\text{donc } K = \theta_i - \theta_e.$$

L'unique solution de l'équation différentielle vérifiée par la température  $\theta$  est :  $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{ax} + \theta_e$ .

2. Au bout d'une heure, la température du gâteau est :

$$\theta = (180 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) \times e^{-3,8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \times 3600 \text{ s}} + 20 \text{ }^\circ\text{C} = 61 \text{ }^\circ\text{C}.$$

## Exercices

### S'entraîner

p. 85

## 11 Connaître les critères de réussite

### Un biberon à la bonne température

1. Le flux thermique est supposé constant pour un intervalle de temps  $\Delta t$  court donc :  $Q = \Phi \times \Delta t$ .

De plus, d'après la loi de Newton :

$$\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta), \text{ d'où } Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t.$$

2. Le système {lait} est supposé incompressible et au repos macroscopique. Il est dans l'état initial à  $\theta_i$ , dans l'état final à  $\theta_f$ .

Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique  $Q$  donc  $W = 0 \text{ J}$ .

D'après le premier principe de la thermodynamique, entre deux états  $i$  et  $f$ ,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$  donc  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ .

De plus, pour un système incompressible :  $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta$ .

L'expression de la relation  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$  devient donc :

$$Q = m \times c \times \Delta \theta.$$

3.  $Q = m \times c \times \Delta \theta$  peut s'écrire d'après la question 1 :

$$m \times c \times \Delta \theta = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t \text{ soit } \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta)$$

Lorsque  $\Delta t$  tend vers zéro, la limite de  $\left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t}\right)$  est égale à la dérivée de  $\theta$  par rapport au temps  $t$  notée  $\frac{d\theta}{dt}$ .

Ainsi :  $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$  ; c'est l'équation différentielle vérifiée par  $\theta$ .

4. Si  $\theta(t) = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$  est solution de l'équation différentielle, donc elle vérifie cette équation.

$$\text{On a : } \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{d\left((\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e\right)}{dt}$$

$$\text{soit } \frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t}$$

En remplaçant  $\theta$  et  $\frac{d\theta(t)}{dt}$  dans l'équation, on obtient :

$$\begin{aligned} -\frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} \\ = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \left((\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e\right) + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e \end{aligned}$$

en simplifiant par  $-\frac{h \times S}{m \times c}$ , l'équation devient :

$$(\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e - \theta_e.$$

L'égalité est vérifiée,  $\theta$  proposée est une solution de l'équation différentielle.

5. Dans l'état final, le lait doit être à la température indiquée pour le nourrisson soit  $\theta_f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$\theta_e = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  est la température du thermostat, constante. La surface doit être exprimée en  $\text{m}^2$ .

$$\text{Donc } \theta_f = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t_f} + \theta_e.$$

$$\text{Soit } t_f = -\frac{m \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right)$$

$$= -\frac{350 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 4,2 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}{300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 270 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \times \ln\left(\frac{30 \text{ }^\circ\text{C} - 50 \text{ }^\circ\text{C}}{5 \text{ }^\circ\text{C} - 50 \text{ }^\circ\text{C}}\right)$$

soit la durée nécessaire  $t_f = 147 \text{ s}$  ou  $t_f = 2,45 \text{ min}$ .

L'indication du fabricant « moins de 3 minutes » est conforme.

## 12 Un métal bien trempé

1. D'après le premier principe de la thermodynamique, entre deux états  $i$  et  $f$ ,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$  donc  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ .

De plus, pour un système incompressible :  $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta$ .

L'expression de la relation  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$  devient donc :  $Q = m \times c \times \Delta \theta$ .

$Q = m \times c \times \Delta \theta$  peut s'écrire, en utilisant la loi de Newton :

$$m \times c \times \Delta \theta = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t \text{ soit } \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta).$$

Lorsque  $\Delta t$  tend vers zéro, la limite de  $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$  est égale à la dérivée de  $\theta$  par rapport au temps  $t$  notée  $\frac{d\theta}{dt}$ .

Soit  $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$  ; c'est l'équation différentielle vérifiée par  $\theta$  pour chacun des transferts thermiques.

2. a. Pour une équation différentielle de la forme  $y' = a \times y + b$ .

Les solutions sont de la forme :  $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ .

Par comparaison, les solutions de l'équation différentielle sont :

$$\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e.$$

Dans le cas de l'étape 1 :  $\theta(t=0) = K + \theta_e = \theta_0$

donc  $K = \theta_0 - \theta_e$  ; la solution de l'équation différentielle est :

$$\theta = (\theta_0 - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e.$$

**b.** Pour la température finale  $\theta_{\text{finale}} = \theta_1$ ,  $t_{\text{final}} = \Delta t_1$

$$\text{soit } \theta_1 = (\theta_0 - \theta_e) \times e^{-\frac{h_1 \times S}{m \times c} \times \Delta t_1} + \theta_e.$$

$$\text{D'où } \Delta t_1 = -\frac{m \times c}{h_1 \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_1 - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}\right);$$

$$\text{soit } \Delta t_1 = -\frac{\rho \times V \times c}{h_1 \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_1 - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}\right)$$

$$\Delta t_1 = -\frac{\rho \times \frac{4}{3} \times \pi \times r^3 \times c}{h_1 \times 4 \times \pi \times r^2} \times \ln\left(\frac{\theta_1 - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}\right)$$

$$\Delta t_1 = -\frac{\rho \times r \times c}{3 \times h_1} \times \ln\left(\frac{\theta_1 - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}\right).$$

$$\text{Donc } \Delta t_1 = -\frac{3\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 15 \times 10^{-3} \text{ m} \times 1,00 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}}{3 \times 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}} \times \ln\left(\frac{320 \text{ °C} - 20 \text{ °C}}{400 \text{ °C} - 20 \text{ °C}}\right)$$

$$\text{D'où } \Delta t_1 = 3,5 \times 10^2 \text{ s.}$$

**3. a.** Dans le cas de l'étape 2, qui commence au bout de la durée  $\Delta t_1$  :  $\theta(t=0) = K + \theta_e = \theta_1$  donc  $K = \theta_1 - \theta_e$  ; la solution de l'équation différentielle est :

$$\theta = (\theta_1 - \theta_e) \times e^{-\frac{h_2 \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e.$$

**b.** Pour la température finale  $\theta_{\text{finale}} = \theta_2$ ,  $t_{\text{final}} = \Delta t_2$

$$\text{soit } \theta_2 = (\theta_1 - \theta_e) \times e^{-\frac{h_2 \times S}{m \times c} \times \Delta t_2} + \theta_e.$$

$$\text{De même qu'en 2, } \Delta t_2 = -\frac{m \times c}{h_2 \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_2 - \theta_e}{\theta_1 - \theta_e}\right).$$

$$\text{Soit } \Delta t_2 = -\frac{\rho \times r \times c}{3 \times h_2} \times \ln\left(\frac{\theta_2 - \theta_e}{\theta_1 - \theta_e}\right).$$

$$\text{Donc } \Delta t_2 = -\frac{3\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 15 \times 10^{-3} \text{ m} \times 1,00 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}}{3 \times 6,0 \times 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}} \times \ln\left(\frac{35 \text{ °C} - 20 \text{ °C}}{320 \text{ °C} - 20 \text{ °C}}\right)$$

$$\Delta t_2 = 75 \text{ s.}$$

**4.** C'est l'eau qui assure le refroidissement le plus rapide.

### 13 À chacun son rythme

#### Fer à repasser

**1.** Le système {semelle du fer} est supposé incompressible et au repos macroscopique.

Le système est dans l'état initial à  $\theta_i = 210 \text{ °C}$ , dans l'état final à  $\theta_f$ . Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique  $Q$  donc  $W = 0 \text{ J}$ .

D'après le premier principe de la thermodynamique, entre deux états  $i$  et  $f$ ,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$  donc  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ .

Or, le flux thermique est supposé constant pour un intervalle de temps  $\Delta t$  très court donc  $Q = \Phi \times \Delta t$ .

De plus, d'après la loi de Newton :

$$\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta), \text{ d'où } Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t.$$

Par ailleurs, pour un système incompressible :  $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta$ . L'expression de la relation  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$  devient :

$$m \times c \times \Delta \theta = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t;$$

$$\text{soit } \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta).$$

Lorsque  $\Delta t$  tend vers zéro, la limite de  $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$  est égale à la dérivée

de  $\theta$  par rapport au temps  $t$ , notée  $\frac{d\theta}{dt}$ , donc :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e.$$

C'est l'équation différentielle vérifiée par la température  $\theta$  du système.

**2.** Les solutions de l'équation différentielle  $y' = ay + b$  ( $a \neq 0$ ) ont pour forme :  $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$  avec  $K$  un réel. Les solutions sont donc ici de la forme :  $\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$ .

À l'instant initial,  $\theta(0) = \theta_i$  (température de repassage d'un pantalon en coton).

D'après la solution,  $\theta(0) = K + \theta_e$ . On en déduit :  $K = \theta_i - \theta_e$ .

L'expression de la température en fonction du temps est :

$$\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e.$$

**3.** À l'instant final, le fer doit être à la température de repassage indiquée pour le tee-shirt en polyester :

$$\theta_f = 150 \text{ °C}$$

Comme  $\theta_f = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t_f} + \theta_e$ , on en déduit :

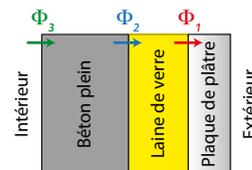
$$t_f = -\frac{m \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right).$$

$$t_f = -\frac{500 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 450 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}}{50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \times 0,025 \text{ m}^2} \times \ln\left(\frac{150 \text{ °C} - 25 \text{ °C}}{185 \text{ °C}}\right)$$

soit la durée nécessaire  $\Delta t = t_f = 71 \text{ s}$ .

### 14 Pertes thermiques

**1.** Schéma en coupe ( $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_{123}$ ) :



**2.** Le mode de transfert thermique mis en jeu est la conduction à travers les murs.

**3.**  $R_{\text{th}} = R_{\text{th}1} + R_{\text{th}2} + R_{\text{th}3}$  soit :

$$R_{\text{th}} = 0,039 \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1} + 0,125 \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1} + 0,013 \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{\text{th}} = 0,177 \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}.$$

**4.** Pour un transfert thermique par conduction en régime permanent indépendant du temps :

$$\Phi = \frac{(\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}})}{R_{\text{th}}} \text{ d'où } \Phi = \frac{(20 \text{ °C} - 5 \text{ °C})}{0,177 \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}} = 85 \text{ W.}$$

**5.** Pour un simple mur en béton :

$$\Phi = \frac{(\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}})}{R_{\text{th}3}} \text{ d'où } \Phi = \frac{(20 \text{ °C} - 5 \text{ °C})}{0,013 \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}} = 1,2 \times 10^3 \text{ W.}$$

Le simple mur en béton est beaucoup moins isolant.

### 15 Résolution de problème

#### Info, intox ou igloo ?

**1<sup>re</sup> étape : S'approprier la question posée**

La température dans l'igloo après une nuit de sommeil du randonneur est-elle de  $10 \text{ °C}$  ?

**2<sup>e</sup> étape : Lire et comprendre les documents**

**1.** Chaque heure de son sommeil, le randonneur fournit le transfert thermique  $Q_1 = 0,50 \text{ MJ}$  à l'air intérieur supposé incompressible.

**2.** La température dans l'igloo est maintenue constante en présence du randonneur.

**3.** L'igloo est bâti avec de la neige compactée et l'on connaît sa conductivité thermique  $\lambda$ .

**4.** La résistance thermique de l'igloo a pour expression  $R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda \times S}$ .

**3<sup>e</sup> étape : Dégager la problématique**

Quelle est la température de l'air dans l'igloo compte-tenu des transferts thermiques ayant lieu ?

#### 4<sup>e</sup> étape : Construire la réponse

- Identifier le système étudié.
- Remarquer que l'igloo est constitué de neige compactée de conductivité thermique  $\lambda$  connue.
- Exprimer puis calculer la résistance thermique de l'igloo.
- Établir l'expression du flux thermique  $\Phi$  sortant de l'igloo en fonction de la résistance thermique et des températures utiles.
- Établir l'expression du flux thermique  $\Phi_1$  apporté par le randonneur en fonction du transfert thermique  $Q_1$ .
- Écrire le premier principe de la thermodynamique appliqué au système.
- En déduire une relation entre  $\Phi_1$  et  $\Phi$ .
- En déduire l'expression de la température intérieure de l'igloo.
- La calculer.
- Conclure.

#### 5<sup>e</sup> étape : Répondre

Pour le système {air intérieur et igloo}, la résistance thermique est :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

$$R_{th} = \frac{30 \times 10^{-2} \text{ m}}{0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \times 14 \text{ m}^2} \text{ soit } R_{th} = 0,086 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \text{ avec les données indiquées.}$$

De plus, le flux thermique  $\Phi$  de l'intérieur vers l'extérieur traversant la paroi de neige compactée de l'igloo est perdu pour le système donc compté négativement :

$$\Phi = \frac{(\theta_{ext} - \theta_{int})}{R_{th}} \text{ avec } (\theta_{ext} - \theta_{int}) < 0 ;$$

connaissant  $R_{th}$  et  $\Phi$ , on pourra en déduire :

$$(\theta_{ext} - \theta_{int}) = \Phi \times R_{th} ;$$

$$\text{soit l'expression de } \theta_{int} = -|\Phi| \times R_{th} + \theta_{ext} .$$

Chaque heure, le randonneur transfère par rayonnement et convection un transfert thermique à l'air intérieur de l'igloo  $Q_1 = 5,0 \times 10^5 \text{ J}$ , ce qui correspond à un flux thermique orienté

$$\text{vers le système } \Phi_1 = \frac{Q_1}{\Delta t} ;$$

$$\text{d'où } \Phi_1 = \frac{5,0 \times 10^5 \text{ J}}{3 \text{ } 600 \text{ s}} \text{ soit } \Phi_1 = + 139 \text{ W.}$$

Le système {air intérieur et igloo} est supposé incompressible et au repos macroscopique ; sa variation d'énergie interne est donc :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta_{\text{système}}$$

Le système est dans l'état initial et final à la même température maintenue constante, d'où :  $\Delta \theta_{\text{système}} = 0$  et  $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$ .

Les deux seuls transferts d'énergie sont des transferts thermiques,  $Q$  entre le système et l'air extérieur et  $Q_1$  entre le système et le randonneur, donc  $W = 0 \text{ J}$ .

$Q$  négatif car perdu,  $Q_1$  positif car gagné.

D'après le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q \text{ soit } \Delta U_{i \rightarrow f} = Q_1 + Q.$$

$$\text{On en déduit } Q_1 + Q = 0 \text{ ou } Q = -Q_1 \text{ soit } \frac{Q}{\Delta t} = -\frac{Q_1}{\Delta t},$$

$$\text{d'où } \Phi = -\Phi_1 \text{ avec } \Phi_1 = 139 \text{ W.}$$

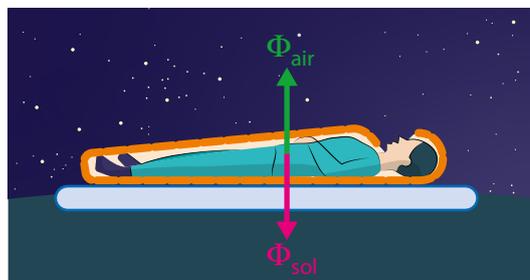
$$\text{On peut alors calculer } \theta_{int} = -\Phi \times R_{th} + \theta_{ext} ;$$

$$\theta_{int} = -(-139 \text{ W}) \times 0,086 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} + (-15 \text{ }^\circ\text{C}) = -3 \text{ }^\circ\text{C} \text{ au sein de l'igloo.}$$

$-3 \text{ }^\circ\text{C}$  est une température supérieure à  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  : le commentaire est exagéré.

#### 16 Bivouac à la belle étoile en montagne

**1. a.** Un flux thermique par conduction traverse le matelas du randonneur vers le sol et l'air : du corps le plus chaud, le randonneur, vers le plus froid, le sol et l'air. Le transfert de la partie supérieure du matelas vers l'air ambiant ne sera pas pris en compte par la suite.



**b.** À l'échelle microscopique, de l'énergie est échangée entre particules, des plus agitées aux moins agitées, par chocs successifs sans déplacement d'ensemble de matière.

**2. a.** Il faut considérer la surface qui correspond à celle occupée par le sac de couchage déroulé sur le sol :  $S = 1,93 \text{ m} \times 0,62 \text{ m}$  et donc  $S = 1,20 \text{ m}^2$ . Mais le randonneur n'occupe qu'une partie du sac et donc la seule valeur plausible est  $S = 0,5 \text{ m}^2$ .

**b.**  $R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$  et  $\Phi = \frac{\Delta \theta}{R_{th}}$ . On en déduit le flux thermique à travers

$$\text{une face du matelas « Sleepy », } \Phi = \frac{\Delta \theta \times \lambda \times S}{e}$$

$$\text{soit } \Phi = \frac{(33 \text{ }^\circ\text{C} - 3 \text{ }^\circ\text{C}) \times 0,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \times 0,5 \text{ m}^2}{1,1 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

On obtient  $\Phi = 4 \times 10^1 \text{ W}$ .

**c.** Le flux thermique évacué à travers matelas « Randy » est plus élevé qu'à travers matelas « Sleepy ». Le matelas « Sleepy » offre de meilleures capacités d'isolation thermique.

#### 17 One or more layers ?

Traduction :

Le tableau ci-dessous indique les résistances thermiques de l'air et de plusieurs matériaux ayant une surface de  $1,0 \text{ m}^2$  et une épaisseur de  $2,0 \text{ mm}$ .

Matériau	Résistance thermique ( $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ )
Air	$7,6 \times 10^{-2}$
Nylon	$8,0 \times 10^{-3}$
Cuir	$1,1 \times 10^{-2}$
Feutre	$5,5 \times 10^{-2}$

**1.** Quel est le matériau le mieux adapté pour un vêtement d'hiver ?

**2. a.** Qu'y a-t-il entre deux vêtements superposés ?

**b.** Pourquoi conseille-t-on de mettre plusieurs vêtements fins plutôt qu'un seul épais pour se préserver du froid ?

Réponses :

**1.** Le matériau le mieux adapté aux vêtements d'hiver est celui qui a la résistance thermique la plus élevée, c'est-à-dire le feutre.

**2. a.** Entre deux vêtements est emprisonnée une fine couche d'air.

**b.** On constate que, pour une même épaisseur  $e$ , l'air a une résistance thermique plus élevée que les matériaux présentés. C'est donc un bon isolant thermique.

Deux vêtements de même épaisseur, l'un constitué d'un tissu unique et l'autre d'une superposition de tissus fins, n'ont pas la même résistance thermique. La résistance du tissu épais est plus faible que la somme de la résistance des tissus fins et de celle de l'air emprisonné entre ces tissus.

#### 18 Eau chaude sanitaire

**1. a.** Pour un système incompressible :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta \text{ avec } m = \rho \times V.$$

Le système {eau du ballon} est incompressible et au repos macroscopique.

Le système est dans l'état initial à  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , dans l'état final à  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ . D'après le premier principe de la thermodynamique, appliqué au système {eau du ballon}, on a :  $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$ .

Le seul transfert d'énergie entre le système {eau du ballon} et le chauffe-eau est un transfert thermique  $Q$  puisque toute perte est négligée. Par ailleurs,  $W = 0$  J. Il vient  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ .

On en déduit  $Q = m \times c \times \Delta\theta$  soit :  $Q = \rho \times V \times c \times \Delta\theta$  en fonction des données.

D'après le premier principe de la thermodynamique appliqué au chauffe-eau puisque toute perte est négligée :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = W_{\text{élec}} + Q_{\text{donnée à l'eau}} = 0.$$

$$\text{Donc } W_{\text{élec}} = -Q_{\text{donnée à l'eau}} = Q_{\text{reçue par l'eau}} = Q.$$

$$\text{Or } W_{\text{élec}} = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t ; \text{ on en déduit : } \Delta t = \frac{W_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{élec}}} = \frac{Q}{\mathcal{P}_{\text{élec}}}$$

$$\text{soit } \Delta t = \frac{\rho \times V \times c \times \Delta\theta}{\mathcal{P}_{\text{élec}}}.$$

$$\Delta t = \frac{1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 200 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (65 \text{ °C} - 15 \text{ °C})}{2200 \text{ W}}$$

soit la durée nécessaire à chauffer l'eau du chauffe-eau :  $\Delta t = 1,9 \times 10^3$  s ou 5,3 h.

**b.**  $\Delta t = 5,3$  h, soit aussi environ 5 h 17 min. La durée concorde avec les données du constructeur.

**2. a.** Le flux thermique à travers les parois du ballon  $\Phi = \frac{\Delta\theta}{R_{\text{th}}}$  ; or  $R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda \times S}$ .

$$\text{On en déduit } \Phi = \frac{(\theta_{\text{eau chaude}} - \theta_{\text{extérieur}}) \times \lambda \times S}{e} ; \text{ d'où}$$

$$\Phi = \frac{(65 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) \times 0,036 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times 2,9 \text{ m}^2}{70 \times 10^{-3} \text{ m}} = 67 \text{ W}.$$

**b.** En un jour, l'énergie perdue est  $Q_{\text{perdue}} = \Phi \times \Delta t$  soit  $Q_{\text{perdue}} = 67 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 1,6 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1}$ .

**3.** Le coefficient de refroidissement du ballon est donné en  $\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$ .

$$\text{On en déduit } C_r = \frac{Q_{\text{perdue}}}{V \times \Delta\theta}.$$

$$\text{Soit } C_r = \frac{1,6 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1}}{200 \text{ L} \times (65 \text{ °C} - 20 \text{ °C})} = 0,18 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}.$$

C'est la valeur annoncée par le constructeur ; elle est donc cohérente.

**4.** La réglementation impose :  $C_{r \text{ max}} = 2 \times V^{-0,4}$  soit :

$$C_{r \text{ max}} = 2 \times (200 \text{ L})^{-0,4} = 0,24 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}.$$

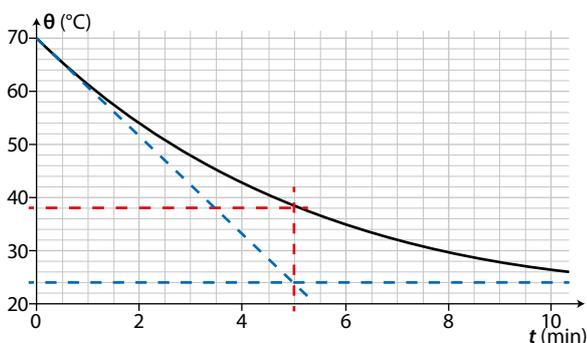
$C_r < C_{r \text{ max}}$  : la législation en vigueur est respectée.

### 19 Refroidissement d'un chocolat

**1.**  $\theta(t) = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_e$  avec  $\theta_i = 70 \text{ °C}$  et  $\theta_e = 20 \text{ °C}$ .

On peut remarquer que si  $t = \tau$ ,  $\theta(\tau) = 50 \times e^{-1} + 20$ , soit  $38 \text{ °C}$ .

On relève :  $\tau = 5,1$  min.



$\tau$  peut être déterminée également en cherchant l'abscisse du point d'intersection de la tangente à la courbe en  $t = 0$  avec la direction asymptotique.

**2. a.** Réponse fautive : au bout de 10 minutes on lit graphiquement que la température n'est pas stabilisée, elle va évoluer encore jusqu'à atteindre  $20 \text{ °C}$ .

**b.** Réponse fautive : la vitesse en un instant donné est proportionnelle au nombre dérivé obtenu à cet instant en considérant la fonction mathématique donnée. Graphiquement, c'est le coefficient directeur de la tangente en un point de la courbe qui donne ce nombre dérivé. La vitesse de refroidissement n'est pas constante : elle diminue au cours du temps (fortement au début) pour devenir nulle en régime permanent indépendant du temps.

**c.** Réponse fautive : l'équilibre thermique avec le milieu ambiant est atteint quand la température est égale à  $20 \text{ °C}$ .

### 20 La science infuse

**1.** Le flux thermique est supposé constant pour un intervalle de temps  $\Delta t$  court donc :  $Q = \Phi \times \Delta t$ .

De plus, d'après la loi de Newton :

$$\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta), \text{ d'où } Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t.$$

Le système {tasse et thé} est supposé incompressible et au repos macroscopique.

Le système est dans l'état initial à  $\theta_i$ , dans l'état final à  $\theta$ .

Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique  $Q$ , donc  $W = 0$  J.

D'après le premier principe de la thermodynamique, entre deux états  $i$  et  $f$ ,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$  donc  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ .

De plus pour un système incompressible,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta\theta$ .

L'expression de la relation  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$  devient donc :  $Q = m \times c \times \Delta\theta$ . On obtient donc l'égalité :  $m \times c \times \Delta\theta = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t$

$$\text{soit } \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta).$$

Lorsque  $\Delta t$  tend vers zéro, la limite de  $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$  est égale à la dérivée de  $\theta$  par rapport au temps  $t$  notée  $\frac{d\theta}{dt}$  ;

soit :  $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$ , c'est l'équation différentielle vérifiée par  $\theta$ .

**2.** Les solutions générales de l'équation différentielle  $y' = a \times y + b$

ont pour forme  $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$  avec  $K$  un réel et  $a \neq 0$ .

Les solutions sont donc de la forme  $\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$ .

Initialement  $\theta(0) = \theta_i$  et d'après la solution,  $\theta(0) = K + \theta_e$  ;

on en déduit :  $K = \theta_i - \theta_e$  donc :  $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$

soit  $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-k \times t} + \theta_e$ .

**3.** À l'instant final  $t_f$ , pour la dégustation :

$$\theta_{\text{dégustation}} = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-k \times t_f} + \theta_e.$$

La durée nécessaire pour obtenir la bonne température est obtenue en isolant  $t_f$  dans l'expression précédente :

$$t_f = -\frac{1}{k} \times \ln\left(\frac{\theta_{\text{dégustation}} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right).$$

$$\text{Donc } t_f = -\frac{1}{1,3 \times 10^{-3} \times \text{s}^{-1}} \times \ln\left(\frac{48 \text{ °C} - 20 \text{ °C}}{60 \text{ °C} - 20 \text{ °C}}\right).$$

La durée nécessaire est de  $\Delta t = t_f = 2,7 \times 10^2$  s soit 4,6 minutes.

Préparation à l'écrit

21 **Vitrage**

Partie I

1. a. Le transfert thermique peut avoir lieu par convection ou par rayonnement.

b. Le transfert thermique  $Q$  fourni par le radiateur à la pièce pendant la durée de référence  $\Delta t_{\text{réf}}$  provient intégralement du travail électrique  $W_{\text{élec}}$ ; donc  $Q = W_{\text{élec}}$ .

Or  $W_{\text{élec}} = U \times I \times \Delta t_{\text{chauffage}}$  et  $I = \frac{U}{R}$  soit  $W_{\text{élec}} = \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{\text{chauffage}}$ .

On sait que  $\Delta t_{\text{chauffage}} = 0,10 \times \Delta t_{\text{réf}}$  d'où  $W_{\text{élec}} = 0,10 \times \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{\text{réf}}$ .

On en déduit  $Q = W_{\text{élec}}$  devient  $Q = 0,10 \times \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{\text{réf}}$ .

2. Un transfert thermique par conduction et convection se produit de la pièce (plus chaude) vers l'extérieur (plus froid). On a donc :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t_{\text{réf}}} = 0,10 \times \frac{U^2}{R}.$$

Application numérique :

$$\Phi = 0,10 \times \frac{(230 \text{ V})^2}{25,0 \Omega}, \text{ soit } \Phi = 212 \text{ W}.$$

3. On a  $\Phi = \frac{T_1 - T_e}{R_{\text{th}}}$  et donc  $R_{\text{th}} = \frac{T_1 - T_e}{\Phi}$ .

Soit  $R_{\text{th}} = \frac{293 \text{ K} - 273 \text{ K}}{212 \text{ W}}$ ;

$R_{\text{th}} = 0,095 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ , résistance thermique proche de  $0,10 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Le vitrage est formé de deux couches de verre entre lesquelles s'intercale une épaisseur d'argon. Ce dernier gaz est formé de « gros » atomes qui se déplacent moins vite que les molécules de diazote et dioxygène à énergies cinétiques identiques : les transferts thermiques par convection sont ainsi plus difficiles.

Partie II

1. Le système étudié {pièce et baie vitrée} est supposé incompressible et au repos macroscopique. Le système est dans l'état initial à  $T_1 = 293 \text{ K}$ , dans l'état final à  $T$ . Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique  $Q$  par convection, donc  $W = 0 \text{ J}$ .

D'après le premier principe de la thermodynamique,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$ , donc  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ .

Or pour un intervalle de temps  $\Delta t$  court  $\Phi$  est supposé constant :  $Q = \Phi \times \Delta t$ .

Pour un système incompressible,  $\Delta U_{i \rightarrow f} = C \times \Delta T$ .  $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$  devient  $C \times \Delta T = \Phi \times \Delta t$ .

2. De plus, d'après la loi de Newton,  $\Phi = h \times S \times (T_e - T)$ ; d'où  $Q = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$ .

$C \times \Delta T = \Phi \times \Delta t$  s'écrit donc aussi :

$$C \times \Delta T = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$$

$$\text{ou } \frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{h \times S}{C} \times T + \frac{h \times S}{C} \times T_e.$$

C'est l'équation différentielle vérifiée par la température  $T$  du système.

Lorsque  $\Delta t$  tend vers zéro, la limite de  $\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)$  est égale à la dérivée

de  $T$  par rapport au temps  $t$  notée  $\frac{dT}{dt}$ , on peut donc écrire :

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{h \times S}{C} \times T + \frac{h \times S}{C} \times T_e.$$

3. La solution générale de l'équation différentielle  $y' = a \times y + b$  ( $a \neq 0$ ) a pour forme :

$$y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a} \text{ avec } K \text{ un réel.}$$

Ici, les solutions sont de la forme :

$$T = K \times e^{-\frac{h \times S}{C} \times t} + T_e.$$

Initialement,  $T(0) = T_1$ ; il vient  $T(0) = K + T_e$ .

$$T_1 = K + T_e \text{ d'où } K = (T_1 - T_e).$$

On a donc finalement :

$$T = (T_1 - T_e) \times e^{-\frac{h \times S}{C} \times t} + T_e.$$

4. À l'état final,  $t_f = -\frac{C}{h \times S} \times \ln\left(\frac{T_f - T_e}{T_1 - T_e}\right)$ .

Ici  $T_e = 273 \text{ K}$ ;  $T_1 = 293 \text{ K}$  et  $T_f = 289 \text{ K}$ .

$$t_f = -\frac{100 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}}{10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \times 8,0 \text{ m}^2} \times \ln\left(\frac{289 \text{ K} - 273 \text{ K}}{293 \text{ K} - 273 \text{ K}}\right),$$

soit  $\Delta t = 2,8 \times 10^2 \text{ s}$  ou environ 4 min 40 s.

22 **Diagnostic thermique**

1. La résistance thermique se calcule à partir de la relation donnée dans le document. Elle est égale à l'inverse du coefficient thermique  $U$  divisé par la surface de contact, afin d'obtenir la résistance thermique dans la bonne unité.

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{S \times U} = \frac{0,125 \times (T_i - T_e)}{T_i - T_{\text{si}}} \times \frac{1}{S}$$

$$\text{soit } R_{\text{th}} = \frac{0,125 \times (293 \text{ K} - 268 \text{ K})}{293 \text{ K} - 291 \text{ K}} \times \frac{1}{25,0 \text{ m}^2}$$

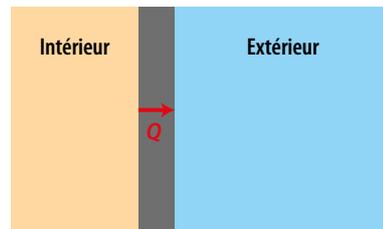
$$R_{\text{th}} = 6,25 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

2. Connaissant la résistance thermique, on peut en déduire le flux :

$$\Phi = \frac{T_i - T_e}{R_{\text{th}}} \text{ d'où } \Phi = \frac{293 \text{ K} - 268 \text{ K}}{6,25 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

$$\Phi = 4,00 \times 10^2 \text{ W}$$

3. a. Le schéma de la situation est le suivant :



Le transfert thermique  $Q$  s'effectue à travers le mur, de l'intérieur vers l'extérieur de l'habitation.

b. On considère que le flux est constant. Dans ce cas :  $Q = \Phi \times \Delta t = 4,00 \times 10^2 \text{ W} \times 3 \text{ 600 s} = 1,44 \times 10^6 \text{ J}$

22 **Un isolant naturel**

1. Il s'agit essentiellement d'un transfert thermique convectif.

2. En présence de duvet la résistance thermique de la cloison est plus grande qu'en absence de duvet. Le refroidissement est plus lent : la courbe rouge est obtenue avec la cloison munie de plumes, la bleue avec la cloison sans plumes.

3. L'équation différentielle vérifiée par la température du système {boîte et cloison} s'écrit aussi

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{\tau} \times \theta + \frac{1}{\tau} \times \theta_e$$

C'est une équation différentielle du premier ordre du type

$y' = ay + b$  dont les solutions sont de la forme :  $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$  avec

$K$  un réel et  $a \neq 0$ .

Il vient :

$$\theta = K \times e^{-\frac{1}{\tau} \times t} + \theta_e$$

Or à  $t = 0$ ,  $\theta(0) = \theta_i$  et  $K = \theta_i - \theta_e$   
D'où la solution de l'équation :

$$\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{1}{\tau} \times t} + \theta_e$$

4. On relève  $\tau_A = 680$  s et  $\tau_B = 240$  s environ grâce au point d'intersection de la tangente à l'origine et de l'asymptote horizontale.

5. a. Avec une calculatrice, on obtient :  $\tau = 716$  s ;  $\sigma_{n-1} = 40$  s ; on en déduit  $u(\tau) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$  avec  $n = 6$  soit  $u(\tau) = \frac{40 \text{ s}}{\sqrt{6}} = 16$  s.

b. L'encadrement du temps caractéristique de l'expérience A est :  
 $\tau = 716 \pm 16$  s

6. D'après les encadrements des temps caractéristiques,  $\tau_A \neq \tau_B$ ,  $\tau$  est plus grand, en présence de plumes et donc le refroidissement nettement plus lent. Cela confirme que le plumage constitue une couche isolante qui minimise le flux thermique traversant la cloison du milieu intérieur vers le milieu extérieur.



# 6

## Sons et effet Doppler

### Programme officiel

#### Ondes et signaux

1. Caractériser les phénomènes ondulatoires	
Notions et contenus	Capacités exigibles
	<b>Activités expérimentales support de la formation</b>
Intensité sonore, intensité sonore de référence, niveau d'intensité sonore. Atténuation (en dB).	Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal. <i>Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.</i> <b>Capacité mathématique :</b> Utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque.
Effet Doppler. Décalage Doppler.	Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension. Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. <i>Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.</i>

### Liens avec les programmes officiels de première (enseignement de spécialité et enseignement scientifique)

Notions	Connaissances et savoir-faire	Modèles associés
<b>PREMIÈRE Enseignement de spécialité</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Onde mécanique progressive, célérité, retard.</li> <li>Onde mécanique progressive périodique, période, longueur d'onde, relation entre période, longueur d'onde et célérité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exploiter la relation entre la durée de propagation, la distance parcourue par une perturbation et la célérité.</li> <li>Justifier et exploiter la relation entre période, longueur d'onde et célérité.</li> </ul>	$v \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow v = \frac{d}{\Delta t} \left\{ \begin{array}{l} d \text{ en m} \\ \Delta t \text{ en s} \end{array} \right.$ $v \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow v = \frac{\lambda}{T} \left\{ \begin{array}{l} \lambda \text{ en m} \\ T \text{ en s} \end{array} \right.$
<b>PREMIÈRE Enseignement scientifique</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Puissance par unité de surface d'une onde sonore.</li> <li>Fréquence fondamentale.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La puissance par unité de surface transportée par une onde sonore est quantifiée par son intensité. Son niveau d'intensité sonore est exprimé en décibels selon une échelle logarithmique. Relier puissance sonore par unité de surface et niveau d'intensité sonore exprimé en décibels.</li> <li>Un signal périodique de fréquence <math>f</math> se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de <math>f</math>. Le son associé à ce signal est un son composé. <math>f</math> est appelée fréquence fondamentale, les autres fréquences sont appelées harmoniques.</li> </ul>	

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo : Double périodicité des ondes mécaniques

1. Sur le graphique, on lit :  $8T = 18,2 \text{ ms}$  ; d'où  $T = 2,28 \text{ ms}$ .  
La fréquence du son produit par cet instrument est :

$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{1}{2,28 \times 10^{-3} \text{ s}} = 4,40 \times 10^2 \text{ Hz}$$

2. La longueur d'onde correspondante est :

$$\lambda = \frac{v}{f} = v \times T$$

$$\lambda = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 2,28 \times 10^{-3} \text{ s} = 7,85 \times 10^{-1} \text{ m}$$

Flash test

1. C ; 2. C ; 3. A.

Activité 1

expérimentale



Tâche complexe

Atténuation des sons

Capacités exigibles

- Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.
- Mesurer un niveau d'intensité sonore.

Matériel :

- Caisson acoustique.
- Source sonore adaptée au caisson.
- Sonomètre adapté au caisson.
- Divers matériaux adaptés au caisson.
- Mètre.

Investigation

1 Étapes de la démarche de résolution :

1<sup>re</sup> étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

Le niveau d'intensité sonore  $L$  se mesure à l'aide d'un sonomètre et a pour unité le décibel, dB (doc. A).

2<sup>e</sup> étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

Comment le niveau d'intensité sonore évolue-t-il quand la distance entre la source sonore et le point de mesure est multipliée par deux ?

3<sup>e</sup> étape : Émettre une hypothèse permettant d'y répondre

Exemple d'hypothèse : quand la distance double, le niveau d'intensité sonore est divisé par 2.

4<sup>e</sup> étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

- Liste du matériel : source sonore, sonomètre, mètre.
- On choisit une distance  $d$ , puis  $2d$ ,  $4d$ ...
- Pour chaque distance, on mesure le niveau d'intensité sonore.

5<sup>e</sup> étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

Lorsque la distance à la source sonore double, le niveau d'intensité sonore est diminué de 6 dB.

L'hypothèse précédente n'était donc pas correcte.

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

Compétences	Capacités attendues	A	B	C	D
S'approprier	Comprendre que le niveau sonore change en fonction de la distance à la source sonore.				
Analyser	– Choisir de mesurer des niveaux d'intensité sonores $L$ pour des distances $d$ doubles par rapport à la source sonore. – Comparer les niveaux d'intensité sonore et trouver une relation entre ces niveaux d'intensité sonores. – Établir l'évolution de $L$ lorsque $d$ double.				
Réaliser	– Poser la source sonore à une extrémité de la table. – Se placer à une distance $d$ de la source sonore ; mesurer $L$ . – Modifier la distance entre la source et le sonomètre de façon à avoir $d' = 2d$ . Mesurer $L'$ .				
Valider	Conclure par la validation ou non de l'hypothèse formulée.				

2 Étapes de la démarche de résolution :

1<sup>re</sup> étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

Un mur antibruit est destiné à diminuer les nuisances sonores (introduction).

Le niveau d'intensité sonore  $L$  se mesure à l'aide d'un sonomètre et a pour unité le décibel dB (doc. A).

Lorsqu'une onde rencontre une paroi, seule une partie de l'énergie incidente est transmise. Le reste de l'énergie est réfléchi et/ou absorbé (doc. B).

L'atténuation sonore d'un mur antibruit est la différence entre le niveau d'intensité sonore de l'onde incidente et celui de l'onde transmise par ce mur. Plus le niveau d'intensité sonore de l'onde transmise est faible et plus le mur est efficace et plus son atténuation est grande (doc. B).

L'atténuation varie en fonction du matériau que l'on place entre la source sonore et le lieu où l'on mesure  $L$ .

## 2<sup>e</sup> étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

Pour quel matériau l'atténuation des ondes sonores est-elle la plus grande ?

## 3<sup>e</sup> étape : Émettre une hypothèse permettant d'y répondre

Exemples d'hypothèses :

– L'atténuation sera plus grande avec du polystyrène qu'avec du plexiglass.

– L'atténuation sera plus grande avec une épaisseur plus grande de matériau.

## 4<sup>e</sup> étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

**Liste du matériel :** source sonore, sonomètre, différents matériaux avec des épaisseurs différentes.

## Protocole :

- Placer le sonomètre face à la source sonore. Intercaler divers matériaux entre la source sonore et le sonomètre, toujours dans la même position.
- Mesurer le niveau d'intensité sonore sans le matériau puis avec le matériau.
- Calculer l'atténuation.

## 5<sup>e</sup> étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

- À distance fixe et épaisseur fixe, le niveau d'intensité sonore dépend du matériau.
- À distance fixe et pour un même matériau, le niveau sonore diminue lorsque l'épaisseur augmente.

## Proposition de grille d'évaluation par compétence :

Compétences	Capacités attendues	A	B	C	D
<b>S'approprier</b>	Comprendre que l'atténuation dépend du matériau.				
<b>Analyser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Choisir de mesurer des niveaux d'intensité sonores <math>L</math> avec et sans matériau entre la source sonore et le capteur, pour une même distance <math>d</math> entre la source et le capteur.</li> <li>– Calculer l'atténuation pour les divers matériaux.</li> <li>– Comparer les résultats et conclure.</li> </ul>				
<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Placer la source sonore à une extrémité de la caisse isolée et le capteur à l'autre extrémité.</li> <li>– Mesurer <math>L</math>.</li> <li>– Introduire un matériau entre la source et le capteur puis mesurer <math>L'</math>.</li> <li>– Calculer l'atténuation <math>A = L - L'</math>.</li> <li>– Recommencer avec d'autres matériaux/d'autres épaisseurs.</li> </ul>				
<b>Valider</b>	Conclure par la validation ou non de l'hypothèse formulée.				

## Un pas vers le cours

**3** Pour lutter contre les nuisances sonores, on peut s'éloigner de la source sonore ou placer entre la source sonore et le lieu où l'on entend un matériau isolant du bruit.

## Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Pour étudier l'influence de l'atténuation géométrique, il faudra se placer le plus loin possible des murs pour éviter toute réflexion parasite. Il est aussi préférable de surélever la source sonore et le sonomètre pour éviter les réflexions sur la paillasse.

## Activité 2

### expérimentale Effet Doppler et vitesse d'un véhicule

p. 94

#### Capacités exigibles

- Déterminer la valeur de la vitesse d'un objet mobile en utilisant le décalage Doppler.
- Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.
- Mettre en œuvre un dispositif permettant de mesurer la période, la longueur d'onde, la célérité d'une onde périodique.

#### Matériel :

- Maquette de voiture équipée d'un émetteur sonore.
- Récepteur sonore.
- Rail avec système de lancement reproductible (élastique).
- Système d'acquisition.
- Logiciel d'analyse.

#### Pratique expérimentale

**1** On utilise un objet mobile qui peut émettre un signal sonore. Cet objet (dans notre cas, une maquette de voiture) est placé sur

un rail pour que le mouvement soit rectiligne. Deux mesures de fréquence vont être réalisées :

- la première s'effectue lorsque l'objet est immobile. On mesure alors la fréquence  $f_0$  de l'onde sonore émise par l'objet ;
- la deuxième s'effectue lorsque l'objet est en mouvement. On mesure la fréquence  $f_1$  de l'onde sonore perçue lorsque le même objet se rapproche à une vitesse de valeur  $v$  constante.

On utilise un lanceur qui permet d'obtenir des conditions reproductibles de lancement.

Dans chaque cas, on utilise un logiciel d'analyse de sons.

Le doc. **A** donne l'expression du décalage Doppler :

$$\Delta f = f_1 - f_0 = \frac{v}{v_{\text{son}}} \times f_0.$$

À partir de cette expression, on isole celle de la vitesse de l'objet en mouvement :

$$v = v_{\text{son}} \times \frac{\Delta f}{f_0}.$$

On prendra comme valeur de la vitesse du signal sonore dans l'air :  $v_{\text{son}} = 345 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**2 a.** Exemple de résultats obtenus :

$f_0$ (Hz)	4 151				
$f_1$ (Hz)	4 166	4 185	4 179	4 170	4 171
$\Delta f$ (Hz)	15	34	28	19	20
$v$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1,2	2,8	2,3	1,6	1,7

**b.** On observe une dispersion des mesures. La moyenne  $\bar{v}$  de cette série de mesures est :  $\bar{v} = 1,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

L'écart-type de cette série de mesures est  $\sigma_{n-1} = 0,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

L'incertitude-type  $u(v) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$  où  $n$  correspond au nombre de

mesures faites dans les mêmes conditions. On a  $n = 5$ .

L'incertitude-type est donc :  $u(v) = \frac{0,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\sqrt{5}} = 0,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

La valeur de la vitesse de l'objet est :  $v = (1,9 \pm 0,3) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Causes d'erreurs possibles :

- la valeur de la vitesse de lancement n'est pas forcément la même d'un enregistrement à l'autre ;
- la valeur de la vitesse n'est pas tout à fait constante au cours d'un enregistrement ;

- la valeur de la vitesse est calculée à partir des mesures de fréquences. Une erreur peut provenir suite à une fréquence d'échantillonnage trop basse ;

- la valeur de la vitesse du son n'est peut-être pas la bonne (liée à la température).

**Remarque pour le professeur**

On pourra faire réfléchir les élèves sur la pertinence de cette incertitude-type compte tenu de la précision du dispositif.

**Un pas vers le cours**

**3** La valeur de la vitesse d'un objet peut être déterminée à partir du décalage Doppler : la mesure de la fréquence de l'onde sonore émise par l'objet à l'arrêt et celle de l'onde sonore perçue lorsque le même objet se rapproche à une vitesse de valeur constante permettent de calculer le décalage Doppler. L'expression du décalage Doppler permet de déterminer la valeur de la vitesse de l'objet.

**Capsule vidéo de cours : Le décalage Doppler**

**QCM**

p. 99

- 1. C ; 2. A ; 3. B ; 4. C ; 5. A et C ; 6. B et C ; 7. B ; 8. A ; 9. C ; 10. A.**

**Exercices**

**Appliquer le cours**

p. 102

**3 CORRIGÉ** Calculer un niveau d'intensité sonore

**1.** Le niveau d'intensité sonore est :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ soit } L = 10 \log\left(\frac{1,2 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

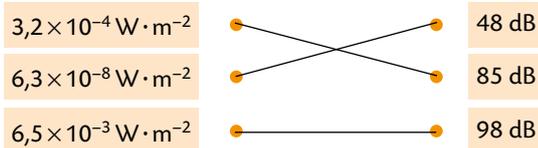
$L = 51 \text{ dB}$ .

**2.** De même, on a  $L = 79 \text{ dB}$ .

**3.** De même, on a  $L = 94 \text{ dB}$ .

**4** Relier  $L$  et  $I$

**1.** Plus l'intensité sonore  $I$  augmente, plus le niveau sonore  $L$  augmente ; donc on peut relier  $L$  et  $I$  sans calcul par :



**2.** Le niveau d'intensité sonore est :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{3,2 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

soit  $L = 85 \text{ dB}$ .

**5 CORRIGÉ** Côté maths

Utiliser le logarithme décimal

**1.** On a  $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$  soit  $\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{L}{10}$ .

D'où  $\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}$  ; l'intensité sonore a donc pour expression

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

**2.** On obtient :

$I$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$L$ (dB)
$1 \times 10^{-5}$	70
$2 \times 10^{-5}$	73
$1 \times 10^{-6}$	60

**6 CORRIGÉ** Mettre en évidence une atténuation

**1.** Le phénomène mis en jeu est l'atténuation par absorption.

**2.** L'atténuation est :  $A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$   
donc  $A = 78 \text{ dB} - 67 \text{ dB}$ , soit  $A = 11 \text{ dB}$ .

**7** Exploiter une atténuation

Avec le casque antibruit, le niveau d'intensité sonore ressenti devient :

$$L = 95 \text{ dB} - 33 \text{ dB} = 62 \text{ dB}$$

Avec les bouchons d'oreilles, le niveau d'intensité sonore ressenti devient :

$$L = 95 \text{ dB} - 26 \text{ dB} = 69 \text{ dB}$$

**8 CORRIGÉ** Reconnaître l'effet Doppler

Seule la situation **C** est une conséquence de l'effet Doppler.

**9** Illustrer l'effet Doppler

De nombreux exemples sont possibles :

- le son émis par la sirène d'une ambulance ou de pompier s'approchant puis s'éloignant d'une personne immobile ;
- le son émis par une voiture passant devant des personnes assises dans les gradins lors d'une course automobile ;
- la réalisation d'une échographie Doppler en médecine, etc.

**10 CORRIGÉ** Exploiter qualitativement l'effet Doppler

On a  $\lambda_R = 669,4 \text{ nm}$  et  $\lambda_E = 656,3 \text{ nm}$ .

On observe l'effet Doppler :

- $\lambda_R \neq \lambda_E$  donc l'étoile est en mouvement par rapport à la Terre ;
- $\lambda_R > \lambda_E$  donc l'étoile s'éloigne de la Terre.

### 11 Connaître l'effet Doppler

•  $f_R > f_E$  est équivalent à  $T_R < T_E$ .

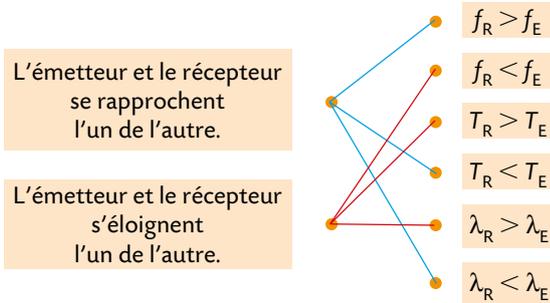
Cela implique  $\lambda_R < \lambda_E$  puisque  $\lambda = v_{\text{onde}} \times T$ .

On a alors  $\Delta f = f_R - f_E > 0$ , donc E et R se rapprochent l'un de l'autre.

•  $f_R < f_E$  est équivalent à  $T_R > T_E$ .

Cela implique  $\lambda_R > \lambda_E$  puisque  $\lambda = v_{\text{onde}} \times T$ .

On a alors  $\Delta f = f_R - f_E < 0$ , donc E et R s'éloignent l'un de l'autre.



### 12 Identifier une expression (1)

1. Le décalage Doppler  $\Delta f$  s'exprime en Hz.

Dans le cas où l'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre, le signe du décalage Doppler est négatif :  $\Delta f < 0$ .

2. • Relation **a** : Il y a homogénéité dans les unités. Comme  $\Delta f < 0$ , il faut que le membre de droite de l'égalité soit aussi négatif ; c'est bien le cas.

• Relation **b** : Il y a homogénéité dans les unités. Le membre de droite de l'égalité n'est pas négatif car  $v_{\text{son}} > v$ . Ce n'est pas la bonne relation.

• Relations **c** et **d** : Il n'y a pas d'homogénéité dans les unités ; ces relations sont fausses.

La bonne relation est la **a**.

### 13 Identifier une expression (2)

L'étoile se rapproche de la Terre ; on a donc  $f_R > f_E$ , ce qui est équivalent à  $\lambda_R < \lambda_E$ .

Dans l'énoncé, la longueur d'onde de l'onde émise est notée  $\lambda_0$ . Celle de l'onde reçue est notée  $\lambda$ . Avec ces notations, on a donc  $\lambda < \lambda_0$ .

• Relation **a** : Comme  $\lambda > 0$ , il vient  $\lambda_0 - \lambda < \lambda_0$ . De plus, comme  $\lambda < \lambda_0$  il vient  $\lambda_0 - \lambda > 0$ .

Et  $\lambda_0 > 0$ . Donc  $\frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda} > 1$ .

Donc  $c \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda} > c$  car  $c > 0$ .

Or  $v < c$ , donc la relation **a** n'est pas correcte.

• Relation **b** : Comme  $\lambda < \lambda_0$  et  $\lambda > 0$ , il vient :  $0 < \lambda_0 - \lambda < \lambda_0$ .

Donc  $0 < \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} < 1$ .

Donc  $0 < c \times \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} < c$  car  $c > 0$ .

Or  $0 < v < c$ , donc la relation **b** est correcte.

• Relation **c** : Comme  $\lambda < \lambda_0$ , il vient  $\lambda - \lambda_0 < 0$ .

Et  $\lambda_0 > 0$ . Donc  $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} < 0$ .

Donc  $c \times \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} < 0$  car  $c > 0$ .

Or  $v > 0$ , donc la relation **c** n'est pas correcte.

### 14 Calculer une valeur de vitesse

La valeur de la vitesse du véhicule est donnée par :

$$v = \frac{c \times \Delta f}{2 \times \cos \alpha \times f_E}$$

$$\text{Donc } v = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 6,451 \times 10^3 \text{ Hz}}{2 \times \cos(20^\circ) \times 3,40 \times 10^{10} \text{ Hz}}$$

soit  $v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 15 Calculer un décalage Doppler

*Erratum* : erreur dans le spécimen corrigé dans le manuel de l'élève. Dans une telle situation, la valeur du décalage Doppler est donnée par :

$$\Delta f = -f_E \times \frac{v}{v_{\text{son}} + v}$$

$$\text{Soit } \Delta f = -435 \text{ Hz} \times \frac{80 \times \frac{10^3}{3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} + 80 \times \frac{10^3}{3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

D'où  $\Delta f = -26 \text{ Hz}$ .

## Exercices

## S'entraîner

p. 104

### 16 Avant le spectacle

1.

	Intensité sonore $I$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Niveau sonore $L$ (dB)
Guitariste 1	$1,0 \times 10^{-4}$	80
Guitariste 2	$1,0 \times 10^{-5}$	70
Guitariste 3	$1,0 \times 10^{-4}$	80
Guitariste 1 et 3	$2,0 \times 10^{-4}$	83

2. Les intensités sonores s'ajoutent ;  $I = 2,1 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Le niveau sonore est :  $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ .

$$\text{Donc } L = 10 \log\left(\frac{2,1 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) = 83 \text{ dB}$$

### 17 The Speed of the Galaxy Q2125-431

**Traduction** : Le décalage Doppler est un phénomène physique important que les astronomes utilisent pour mesurer les vitesses radiales des étoiles et des galaxies lointaines. La formule de base pour les mouvements lents (vitesses beaucoup plus lentes que la vitesse de la lumière) est :

$$\text{vitesse} = 299\,792 \times \frac{\lambda_0 - \lambda_r}{\lambda_r}$$

Nous considérons que cette formule est valable ici.

La vitesse de l'objet en km/s peut être trouvée en mesurant la longueur d'onde observée  $\lambda_0$  du signal de l'objet, et en sachant que la longueur d'onde au repos du signal est  $\lambda_r$ , avec des longueurs d'onde mesurées en angströms, Å ( $1 \text{ Å} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$ ).

Ceci est une petite partie du spectre de la galaxie Seyfert Q2125-431 dans la constellation Microscopium. Un astronome a identifié les lignes spectrales pour l'Hydrogen-Alpha ( $\lambda_{r\alpha} = 6\,563 \text{ Å}$ ) et Beta ( $\lambda_{r\beta} = 5\,007 \text{ Å}$ ).

<http://www.nasa.gov>

1. Calculer le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau des raies pour l'Hydrogen-Alpha et pour l'Hydrogen-Beta.

2. La galaxie Seyfert Q2125-431 s'approche-t-elle ou s'éloigne-t-elle de la Terre ?

3. Déterminer la valeur de la vitesse d'éloignement ou de rapprochement de la galaxie Q2125-431 par rapport à la Terre.

## Réponses

**1.** Le spectre de la lumière provenant de la galaxie Q2125-431 permet d'évaluer la longueur d'onde de la raie  $H_{\alpha}$ . Elle est égale à environ  $\lambda_{0\alpha} = 7\,350 \text{ \AA}$ . De plus, d'après le texte, la longueur d'onde de la raie  $H_{\alpha}$  mesurée sur Terre pour une source au repos est  $\lambda_{r\alpha} = 6\,563 \text{ \AA}$ .

Le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau pour la raie  $H_{\alpha}$  est donc :

$$\Delta\lambda = \lambda_{0\alpha} - \lambda_{r\alpha} \text{ soit } \Delta\lambda = 7\,350 \text{ \AA} - 6\,563 \text{ \AA} = 787 \text{ \AA}.$$

Pour la raie  $H_{\beta}$ , on a environ  $\lambda_{0\beta} = 5\,430 \text{ \AA}$  et d'après le texte  $\lambda_{r\beta} = 5\,007 \text{ \AA}$ .

Le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau pour la raie  $H_{\beta}$  est :  $\Delta\lambda = \lambda_{0\beta} - \lambda_{r\beta}$  soit  $\Delta\lambda = 5\,430 - 5\,007 = 423 \text{ \AA}$ .

**2.** On a  $\Delta\lambda > 0$ ; la galaxie Seyfert Q2125-431 s'éloigne de la Terre.  
**3.** La valeur de la vitesse d'éloignement de la galaxie Q2125-431 par rapport à la Terre est :

$$v = 299\,792 \times \frac{\Delta\lambda}{\lambda_r}.$$

Avec la raie  $H_{\alpha}$ , on obtient :  $v = 3,59 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Avec la raie  $H_{\beta}$ , on obtient :  $v = 2,53 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

La dispersion des valeurs laisse penser que, de façon arrondie,  $v = 3 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 18 Enceinte Bluetooth

**1.** L'intensité sonore  $I$  du son perçu par une personne située à 1,0 m de l'enceinte est  $I = \frac{P}{S}$ .

$$\text{Donc } I = \frac{0,12 \text{ W}}{4\pi \times 1,0^2 \text{ m}^2} = 1,9 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

**2.** Le niveau d'intensité sonore est :  $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ .

$$\text{Donc } L = 10 \log\left(\frac{1,9 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) = 103 \text{ dB}.$$

**3.** À 2,0 m de l'enceinte, l'intensité sonore du son perçu sera  $I' = \frac{P}{S'}$ .

$$\text{Soit } I' = \frac{0,12 \text{ W}}{4\pi \times 2,0^2 \text{ m}^2} = 4,8 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Le niveau d'intensité sonore sera :  $L' = 10 \log\left(\frac{I'}{I_0}\right)$

$$\text{soit } L' = 10 \log\left(\frac{4,8 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) = 97 \text{ dB}.$$

## 19 Connaître les critères de réussite Au son de la corne de brume

**1.** Le niveau d'intensité sonore est donné par :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right). \text{ Donc } \frac{L}{10} = \log\left(\frac{I}{I_0}\right).$$

En utilisant la réciproque de la fonction logarithme, on obtient :

$$\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}. \text{ Et finalement : } I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}.$$

$$\text{Donc } I = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 10^{\frac{115 \text{ dB}}{10}} \text{ soit } I = 3,2 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

**2. a.** Le niveau d'intensité sonore à 50 m de la corne de brume est donné par :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right). \text{ Donc } L = 10 \log\left(\frac{1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

soit  $L = 80 \text{ dB}$ .

**b.** L'atténuation géométrique du signal est  $A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}}$  donc  $A = 115 \text{ dB} - 80 \text{ dB}$  soit  $A = 35 \text{ dB}$ .

## 20 Expérience historique

**1.** Le phénomène mis en jeu est l'effet Doppler.

**2.** Les musiciens situés au bord de la voie ferrée entendent un La#, soit une note de fréquence  $f_R$  égale à 464 Hz.

**3.** La valeur de la vitesse du train se déduit de l'expression du décalage Doppler :  $\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}} - v}$ .

$$\text{Il vient } \Delta f \times (v_{\text{onde}} - v) = f_E \times v.$$

$$\text{Et ensuite } \Delta f \times v_{\text{onde}} = f_E \times v + \Delta f \times v$$

$$\text{soit } v \times (f_E + \Delta f) = \Delta f \times v_{\text{onde}}. \text{ Or } \Delta f = f_R - f_E.$$

$$\text{D'où } v \times f_R = (f_R - f_E) \times v_{\text{onde}}.$$

$$\text{Ainsi } v = \frac{f_R - f_E}{f_R} \times v_{\text{onde}}.$$

$$\text{Ce qui s'écrit aussi } v = v_{\text{onde}} \times \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right).$$

$$\text{Donc } v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \left(1 - \frac{440 \text{ Hz}}{464 \text{ Hz}}\right) = 17,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

## 21 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'éloignement d'un émetteur

**1.** D'après la relation entre la valeur de vitesse, la distance parcourue et la durée de parcours :  $t_2 = \frac{d}{v_{\text{onde}}}$ .

**2. a.** De même,  $d_E = v_E \times T_E$ .

**b.** La distance qui sépare E et R est :

$$d_3 = d + d_E = d + v_E \times T_E.$$

$$\text{c. } t_4 = T_E + \frac{d_3}{v_{\text{onde}}} = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}}$$

**3.**  $T_R = t_4 - t_2$  soit :

$$T_R = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}} - \frac{d}{v_{\text{onde}}} = T_E + \frac{v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}} = T_E \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{\text{onde}}}\right)$$

C'est la période de l'onde reçue.

**4. a.** On déduit de la relation précédente :  $\frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_E} \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{\text{onde}}}\right)$

$$\text{d'où } f_E = f_R \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{\text{onde}}}\right) \text{ soit } f_E = f_R \times \frac{v_{\text{onde}} + v_E}{v_{\text{onde}}}.$$

**b.** L'expression précédente conduit à :

$$f_E \times v_{\text{onde}} = f_R \times (v_{\text{onde}} + v_E)$$

$$\text{d'où } \frac{f_E \times v_{\text{onde}}}{f_R} = v_{\text{onde}} + v_E \text{ soit } v_E = \frac{f_E \times v_{\text{onde}}}{f_R} - v_{\text{onde}}.$$

$$\text{Finalement : } v_E = v_{\text{onde}} \times \left(\frac{f_E}{f_R} - 1\right) = v_{\text{onde}} \times \frac{f_E - f_R}{f_R}.$$

## 22 Avion de chasse

**1.** Les positions successives de l'avion entre les instants  $t_0$  et  $t_6$  s'obtiennent à partir de la relation entre la valeur de vitesse constante, la distance parcourue et la durée de parcours :  $d = v \times \Delta t$ . On a ainsi :

Position	Instant	Distance	Distance sur le schéma
$M_0$	$t_0 = 0 \text{ s}$	$M_0 M_0 = 0 \text{ m}$	0,0 cm
$M_1$	$t_1 = 0,1 \text{ s}$	$M_0 M_1 = 20 \text{ m}$	1,0 cm
$M_2$	$t_2 = 0,2 \text{ s}$	$M_0 M_2 = 40 \text{ m}$	2,0 cm
$M_3$	$t_3 = 0,3 \text{ s}$	$M_0 M_3 = 60 \text{ m}$	3,0 cm
$M_4$	$t_4 = 0,4 \text{ s}$	$M_0 M_4 = 80 \text{ m}$	4,0 cm
$M_5$	$t_5 = 0,5 \text{ s}$	$M_0 M_5 = 100 \text{ m}$	5,0 cm
$M_6$	$t_6 = 0,6 \text{ s}$	$M_0 M_6 = 120 \text{ m}$	6,0 cm

Le schéma complet est fait en **2. b**.

**2. a.** L'onde se propage sur une distance  $d = v_S \times \Delta t$  et  $\Delta t = t_6 - t_1$ ; on obtient alors :

$$d_5 = v_S \times (t_6 - t_5)$$

$d_5 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,5 \text{ s}) = 34 \text{ m}$   
soit 1,7 cm à l'échelle proposée ;

$d_4 = v_s \times (t_6 - t_4)$   
 $d_4 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,4 \text{ s}) = 68 \text{ m}$   
soit 3,4 cm à l'échelle proposée ;

$d_3 = v_s \times (t_6 - t_3)$   
 $d_3 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,3 \text{ s}) = 102 \text{ m}$   
soit 5,1 cm à l'échelle proposée ;

$d_2 = v_s \times (t_6 - t_2)$   
 $d_2 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,2 \text{ s}) = 136 \text{ m}$   
soit 6,8 cm à l'échelle proposée ;

$d_1 = v_s \times (t_6 - t_1) = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,1 \text{ s}) = 170 \text{ m}$   
soit 8,5 cm à l'échelle proposée ;

$d_0 = v_s \times (t_6 - t_0) = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0 \text{ s}) = 204 \text{ m}$   
soit 10,2 cm à l'échelle proposée.

**b.** Voir le schéma à la fin du chapitre.

**3.** À l'avant de l'avion, les fronts des ondes sphériques sont plus resserrés qu'en arrière.

Il en résulte qu'il existe deux longueurs d'onde apparentes  $\lambda'$  et  $\lambda''$  pour un observateur terrestre. La longueur d'onde à l'avant de l'avion,  $\lambda'$ , est plus petite que celle à l'arrière,  $\lambda''$ .

**4.** Pour une onde,  $\lambda = \frac{v_s}{f}$ , à  $v_s$  identique, plus la longueur d'onde  $\lambda$  est courte, plus la fréquence  $f$  est grande. Il existe donc deux fréquences  $f'$  et  $f''$  pour un observateur terrestre. Par rapport à la fréquence  $f$  de l'onde émise par l'avion dans le référentiel du pilote, l'observateur va entendre un son plus aigu si l'avion se rapproche de lui (car  $f' > f$ ) et un son plus grave si l'avion s'éloigne (car  $f'' < f$ ). C'est l'effet Doppler.

## 23 Résolution de problème

### Au concert

**1<sup>re</sup> étape : S'approprier la question posée**

- Quel est le niveau d'intensité sonore de l'onde perçue par l'auditeur ?
- Peut-il rester autant qu'il veut pour écouter ce concert ?

**2<sup>e</sup> étape : Lire et comprendre les documents**

Le doc. **A** permet de déterminer la variation du niveau d'intensité sonore en fonction de l'orientation pour une distance constante. Le doc. **B** permet de déterminer la position de l'auditeur (distance du haut-parleur et angle par rapport à l'axe principal du haut-parleur). Le doc. **C** nous renseigne sur les seuils de dangerosité pour l'oreille.

**3<sup>e</sup> étape : Dégager la problématique**

Le son perçu par l'auditeur situé dans la position donnée par le doc. **B** pendant 2 heures respecte-t-il les normes internationales des seuils de dangerosité pour l'oreille humaine ?

**4<sup>e</sup> étape : Construire la réponse**

- Déterminer la position de l'auditeur par rapport au haut-parleur.
- En déduire le niveau d'intensité sonore du son perçu.
- Vérifier si l'auditeur peut écouter le concert de 2 heures en toute sécurité.

**5<sup>e</sup> étape : Répondre**

• Pour savoir si l'auditeur peut écouter le concert de 2 heures en toute sécurité, il faut déterminer le niveau sonore du son qu'il perçoit.

La distance entre l'auditeur et le haut-parleur est déterminée à l'aide de l'échelle du doc. **B** : on trouve environ 12 m.

• On calcule le niveau d'intensité sonore à cette distance : d'après le texte, à 2,0 m, le niveau d'intensité sonore est  $L = 110 \text{ dB}$  ; l'intensité sonore est :

$$I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}} = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 10^{\frac{110}{10}}$$

soit  $I = 1,0 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

L'intensité sonore  $I$  (en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) est inversement proportionnelle au carré de la distance  $d$  (en m) séparant la source de l'auditeur

$$I = \frac{k}{d^2}.$$

• On calcule l'intensité sonore  $I'$  à 12 m :  $I' = \frac{k}{d'^2} = \frac{I \times d^2}{d'^2}$

$$\text{soit } I' = \frac{1,0 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 2,0^2 \text{ m}^2}{12^2 \text{ m}^2} = 2,8 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Le niveau d'intensité sonore à cette distance est :  $L' = 10 \log\left(\frac{I'}{I_0}\right)$ .

$$\text{Donc } L' = 10 \log\left(\frac{2,8 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) \text{ soit } L' = 95 \text{ dB}.$$

D'après le doc. **B**, l'auditeur est à  $30^\circ$  de l'axe du haut-parleur. Sur le doc. **A**, on constate que pour un angle de  $30^\circ$  par rapport à l'axe du haut-parleur, la variation du niveau d'intensité sonore est  $-6 \text{ dB}$ . Cela ramène le niveau sonore du son perçu à  $89 \text{ dB}$ .

Le doc. **C** précise que l'on peut percevoir pendant 8 heures un son dont le niveau d'intensité sonore est égal à  $85 \text{ dB}$ . De plus, le seuil augmente de  $3 \text{ dB}$  quand la durée est divisée par 2. Il diminue donc de  $3 \text{ dB}$  quand la durée est multipliée par 2.

Cette durée sera donc de 4 heures pour  $88 \text{ dB}$  et 2 heures pour  $91 \text{ dB}$ .

L'auditeur perçoit un son dont le niveau d'intensité sonore est  $89 \text{ dB}$ , il peut donc assister au concert de 2 heures en sécurité.

## 24 Contrôle de vitesse

**1. a.** Le cinémomètre (radar) émet une onde qui est réfléchiée par la voiture en mouvement. L'effet Doppler se produit deux fois ; une première fois lorsque l'onde rencontre la voiture qui joue alors le rôle de récepteur, puis une seconde fois lorsqu'une onde réfléchiée est « émise » par la voiture qui joue alors le rôle d'émetteur de l'onde réfléchiée.

**b.** La voiture se rapproche du cinémomètre, donc  $f_R > f_E$ .

**2.** On exploite le document pour déterminer ces fréquences : la plus petite est  $f_E$  donc  $f_E = 40,000 \text{ kHz}$  et par conséquent  $f_R = 40,280 \text{ kHz}$ .

**3.** Les relations **a** et **b** ne sont pas homogènes ; elles sont donc fausses.

De plus, on doit avoir  $f_R > f_E$  or, dans la relation **c**,  $\left(1 - \frac{2v}{v_s}\right) < 1$ , ce qui conduit à  $f_R < f_E$ . Donc la relation **c** est fautive.

La seule relation juste est donc la relation **d** car elle est homogène et donne le bon signe, et  $\frac{2v}{v_s} + 1 > 1$ , ce qui conduit à  $f_R > f_E$ .

$$\text{Donc } f_R = f_E \times \left(\frac{2v}{v_s} + 1\right).$$

**4.** La valeur de la vitesse  $v$  de l'objet est déterminée à partir de la relation **d** :  $f_R = f_E \times \left(\frac{2v}{v_s} + 1\right)$ ,

$$\text{d'où } \frac{2v}{v_s} = \frac{f_R}{f_E} - 1 \text{ et donc } v = \frac{v_s}{2} \times \left(\frac{f_R}{f_E} - 1\right).$$

$$\text{D'où } v = \frac{340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2} \times \left(\frac{40,280 \text{ kHz}}{40,000 \text{ kHz}} - 1\right), \text{ soit } v = 1,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**5. a.** La valeur de la vitesse de l'objet obtenue par vidéo est le coefficient directeur de la droite représentant la distance parcourue en fonction du temps :

$$v_{\text{vidéo}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0,26 \text{ m} - 0 \text{ m}}{0,24 \text{ s} - 0 \text{ s}} \text{ soit } v_{\text{vidéo}} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

**b.** Les valeurs de vitesse obtenues par les deux méthodes sont en accord entre elles.

Préparation à l'écrit

**25 CORRIGÉ** Effet Doppler et contrôle de vitesse

**Partie I**

**1. a.** Le rapport  $\frac{c+v}{c}$  n'a pas d'unité donc  $f_1$  et l'expression  $f_E \times \frac{c+v}{c}$  ont la même unité : Hz, c'est-à-dire  $s^{-1}$ . L'expression est homogène.

**b.** Le décalage Doppler est :

$$\Delta f = f_1 - f_E = f_E \times \frac{c+v}{c} - f_E = f_E \times \left( \frac{c+v}{c} - 1 \right) = f_E \times \frac{v}{c}.$$

Et  $f_E \times \frac{v}{c} > 0$  donc  $\Delta f > 0$  soit  $f_1 > f_E$ ; c'est bien compatible avec le fait que la voiture (récepteur) se rapproche du radar (émetteur).

**2. a.** La voiture joue le rôle d'émetteur et se rapproche du radar à la vitesse de valeur  $v$ ; elle émet une onde de fréquence  $f_1$ . La fréquence  $f_R$  des ondes reçues par le radar est déterminée en suivant la démarche du cours (paragraphe **2. b.** page 353) :

$$f_R = f_1 \times \frac{c}{c-v}.$$

**b.** Sachant que  $f_1 = f_E \times \frac{c+v}{c}$ , il vient :

$$f_R = f_E \times \frac{c+v}{c} \times \frac{c}{c-v} = f_E \times \frac{c+v}{c-v}.$$

**c.** Le décalage Doppler est donné par :

$$\Delta f = f_R - f_E = f_E \times \frac{c+v}{c-v} - f_E = f_E \times \left( \frac{c+v}{c-v} - 1 \right)$$

$$\Delta f = f_E \times \left( \frac{c+v}{c-v} - \frac{c-v}{c-v} \right) = f_E \times \frac{c+v-c+v}{c-v} = f_E \times \frac{2v}{c-v}.$$

De plus, si  $v \ll c$ , il vient  $c-v \approx c$ .

$$\text{Et alors on a } \Delta f = f_E \times \frac{2v}{c} = 2f_E \times \frac{v}{c}.$$

**3. a.** L'ordre de grandeur du décalage Doppler est :

$$\Delta f = 2 \times 10^{10} \text{ Hz} \times \frac{10^1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}{3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}} = 10^3 \text{ Hz}.$$

**b.** La fréquence des ondes émises est connue avec précision. L'incertitude porte donc uniquement sur la vitesse  $v$  ;

$$u(\Delta f) = \Delta f \times \frac{u(v)}{v} = 10^3 \text{ Hz} \times \frac{0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}{10^1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}} = 10^1 \text{ Hz} ;$$

l'ordre de grandeur de la précision sur  $\Delta f$  est  $10^1$  Hz.

**c.** La mesure directe de  $f_R$  devrait être faite avec une incertitude de l'ordre de  $10^1$  Hz pour une fréquence de  $10^{10}$  Hz, soit une précision relative de  $10^{-9}$ ; une telle précision ne peut être atteinte.

**Partie II**

**1. a.** La mesure de la période  $T$  se fait à partir du signal B : on a  $4 \times T = 880 \mu\text{s}$  d'où  $T = 220 \mu\text{s}$ .

**b.** La valeur absolue du décalage Doppler est :

$$|\Delta f| = \frac{1}{T} \text{ donc } |\Delta f| = \frac{1}{220 \times 10^{-6} \mu\text{s}} = 4,55 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$\text{soit } |\Delta f| = 4,55 \times 10^3 \text{ Hz}.$$

L'incertitude-type sur la valeur absolue du décalage Doppler est :

$$u(|\Delta f|) = |\Delta f| \times \frac{u(T)}{T} \text{ donc } u(|\Delta f|) = 4\,545 \text{ Hz} \times \frac{10 \mu\text{s}}{220 \mu\text{s}}$$

$$\text{soit } u(|\Delta f|) = 2 \times 10^2 \text{ Hz}$$

La valeur absolue du décalage Doppler est :

$$|\Delta f| = (45 \pm 2) \times 10^2 \text{ Hz}.$$

**2.** Le véhicule se rapproche du radar,  $\Delta f > 0$ .

**3. a.** D'après la relation donnée dans la partie I, la valeur de la vitesse du véhicule est :  $v = \frac{c \times \Delta f}{2 \times f_E}$ .

$$\text{Donc } v = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \times 4\,545 \text{ Hz}}{2 \times 3,0 \times 10^{10} \text{ Hz}} \text{ soit } v = 23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Son incertitude-type est  $u(v) = v \times \frac{u(\Delta f)}{\Delta f}$  car  $c$  est connue précisément et on suppose qu'il en est de même pour  $f_E$ .

$$\text{Donc } u(v) = 23 \times \frac{207 \text{ Hz}}{4\,545 \text{ Hz}} \text{ soit } u(v) = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

**b.** Pour améliorer la précision de la détermination de la valeur de la vitesse d'un véhicule, on peut augmenter la fréquence  $f_E$  ou diminuer  $u(\Delta f)$  en diminuant  $u(T)$ .

**26 CORRIGÉ** Niveau sonore et scène de concert

**1. a.** L'intensité sonore du son reçu par un spectateur placé à 1,0 m de l'enceinte est :

$$I = \frac{P}{S} = \frac{4,0 \times 10^{-1} \text{ W}}{4\pi \times 1,0^2 \text{ m}^2} \text{ soit } I = 6,4 \times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ (son uniformément réparti sur une demi-sphère).}$$

**b.** Si le spectateur est placé à 4,0 m de l'enceinte, l'intensité sonore devient :

$$I' = \frac{P}{S'} = \frac{4,0 \times 10^{-1} \text{ W}}{4\pi \times 4,0^2 \text{ m}^2} \text{ soit } I' = 4,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

**2. a.** Le niveau d'intensité sonore à 1,0 m de l'enceinte est :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ donc } L = 10 \log\left(\frac{6,4 \times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}\right)$$

$$\text{soit } L = 108 \text{ dB}.$$

$$\text{À } 4,0 \text{ m, le niveau d'intensité sonore sera : } L' = 10 \log\left(\frac{I'}{I_0}\right).$$

$$\text{Donc } L' = 10 \log\left(\frac{4,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}\right) \text{ soit } L' = 96 \text{ dB}.$$

Plus on s'éloigne de l'enceinte, plus le niveau sonore diminue.

**b.** L'atténuation géométrique est :

$$A = 108 \text{ dB} - 96 \text{ dB} = 12 \text{ dB}.$$

**3. a.** En plaçant une deuxième enceinte identique à la première à côté de celle-ci, les intensités sonores s'ajoutent :  $I'' = 2 \times I'$ .  
Donc  $I'' = 2 \times 4,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  soit  $I'' = 8,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

À 4,0 m, le niveau d'intensité sonore sera :

$$L'' = 10 \log\left(\frac{I''}{I_0}\right) \text{ donc } L'' = 10 \log\left(\frac{8,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}\right)$$

$$\text{soit } L = 99 \text{ dB}.$$

**b.** La puissance sonore  $P$  répartie sur une surface  $S$  est :

$$P'' = I \times S ; \text{ donc } P'' = 8,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \times \frac{4\pi \times 4,0^2 \text{ m}^2}{2}$$

$$\text{soit } P'' = 8,0 \times 10^{-1} \text{ W}.$$

On constate que  $P$  double en mettant deux enceintes identiques l'une à côté de l'autre.

Le seuil de danger est estimé à 90 dB.

• On calcule l'intensité sonore correspondant au seuil de danger :

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

$$\text{Donc } I''' = 1 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \times 10^{\frac{90 \text{ dB}}{10}}$$

$$\text{soit } I''' = 1,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

• On détermine la distance pour laquelle le spectateur n'a plus de risque auditif, la puissance sonore  $P''$  ne variant pas. Cette surface est celle d'une demi-sphère de rayon  $r$ .

$$\text{On a donc : } S = \frac{4\pi \times r^2}{2} = \frac{P''}{I'''} \text{ d'où } r = \sqrt{\frac{2 \times P''}{4\pi \times I'''}}.$$

$$\text{Donc } r = \sqrt{\frac{2 \times 8,0 \times 10^{-1} \text{ W}}{4\pi \times 1,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}} \text{ soit } r = 11 \text{ m}.$$

Le spectateur doit être à 11 mètres de l'enceinte.

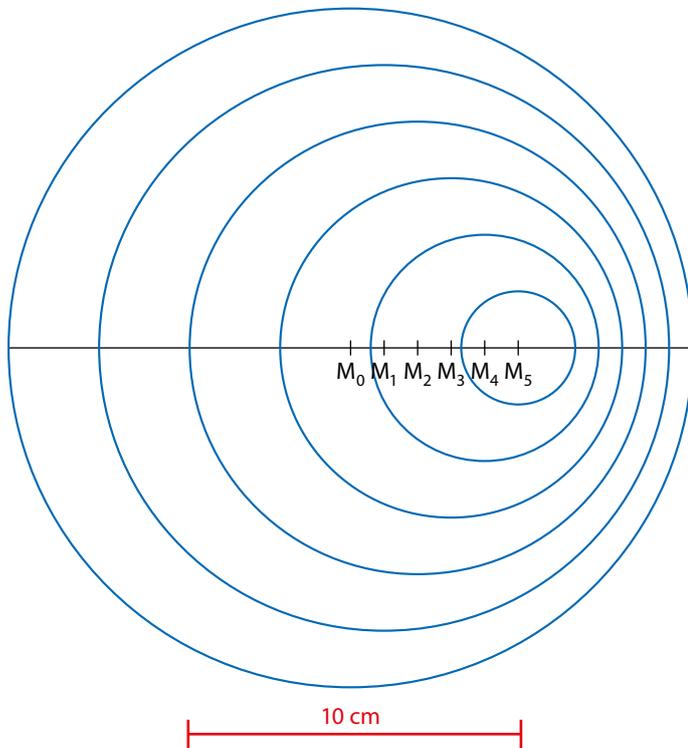
**4. a.** Avec les bouchons en mousse, les sons aigus (sons de grandes fréquences) sont plus atténués que les sons graves. Les

sons les plus aigus vont donc « manquer » dans le spectre du son perçu, d'où une impression d'un son perçu plus grave que celui qui est émis.

**b.** Dans le cas des bouchons moulés, l'atténuation est approximativement la même quelle que soit la fréquence du signal reçu. Cet effet sera donc beaucoup moins ressenti avec les bouchons moulés.

**c.** Dans le cas d'un concert, il s'agit d'atténuer le niveau du son reçu sans déformer le message sonore et donc la composition spectrale de celui-ci : le bouchon moulé est alors le mieux adapté.

Réponse de l'exercice **22 1** et **2.b.**





# 7

## Diffraction et interférences

### Programme officiel

#### Ondes et signaux

1. Caractériser les phénomènes ondulatoires	
Notions et contenus	Capacités exigibles
	<i>Activités expérimentales support de la formation</i>
Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques.  Angle caractéristique de diffraction.	Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.  <i>Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées. Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.</i>
Interférences de deux ondes, conditions d'observation. Interférences constructives. Interférences destructives.	Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène. <i>Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.</i>

### Liens avec le programme officiel de première (enseignement de spécialité et enseignement scientifique)

Notions	Connaissances et savoir-faire	Modèles associés
<ul style="list-style-type: none"> <li>Onde mécanique progressive, célérité, retard.</li> <li>Onde mécanique progressive périodique, période, longueur d'onde, relation entre période, longueur d'onde et célérité</li> <li>Relation entre longueur d'onde, célérité de la lumière et fréquence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exploiter la relation entre la durée de propagation, la distance parcourue par une perturbation et la célérité.</li> <li>Justifier et exploiter la relation entre période, longueur d'onde et célérité.</li> <li>Citer l'ordre de grandeur des fréquences ou des longueurs d'onde des ondes de la lumière visible.</li> </ul>	$v \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow v = \frac{d}{\Delta t} \leftarrow \begin{array}{l} d \text{ en m} \\ \Delta t \text{ en s} \end{array}$ $v \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow v = \frac{\lambda}{T} \leftarrow \begin{array}{l} \lambda \text{ en m} \\ T \text{ en s} \end{array}$ <p>La longueur d'onde <math>\lambda</math> et la fréquence <math>\nu</math> d'une radiation lumineuse sont liées par :</p> $\lambda \text{ en m} \rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu} \leftarrow \begin{array}{l} c \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1} \\ \nu \text{ en Hz} \end{array}$

#### Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Contrairement au programme officiel d'enseignement de spécialité, le programme ne mentionne pas la notion de chemin optique. Elle ne sera donc pas utilisée dans ce chapitre.

## Activité 1

### expérimentale Le phénomène de diffraction

p. 110

#### Capacités exigibles

- Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées.
- Mettre en œuvre des dispositifs permettant d'étudier les phénomènes de diffraction et d'interférences.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation de sources lumineuses.

#### Matériel :

- Cuve à ondes avec accessoires.
- Fentes de différentes tailles pour l'étude de la diffraction des ondes lumineuses.
- Laser vert.
- Laser rouge.
- Écran.
- Support élévateur.
- Règle.

#### Pratique expérimentale

**1 a.** Dans le cas des ondes mécaniques, on utilise une cuve à ondes qui produit, grâce à un excitateur, des ondes progressives périodiques à la surface de l'eau. Ces ondes traversent ensuite une ouverture de taille  $a$  que l'on peut modifier.

Dans le cas des ondes lumineuses, on utilise un laser émettant des ondes de longueur d'onde  $\lambda$  qui éclaire des fentes de différentes tailles. On utilise le dispositif du doc. **B** (la distance  $D$  doit être supérieure à 1 m pour des mesures précises et pour se placer dans les conditions de diffraction de Fraunhofer).

Dans les deux cas, on détermine comment varie l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  quand la taille de l'ouverture augmente :

on constate que l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  diminue quand la taille de l'ouverture augmente.

**b.** Pour déterminer comment varie l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , on utilise les lasers vert et rouge ; chaque laser produit des ondes de longueur d'onde  $\lambda$  différente et éclaire une ouverture de taille  $a$  identique. On utilise le dispositif du doc. **B**.

On constate que l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  augmente quand la longueur d'onde de la radiation augmente.

**Remarque :** L'utilisation de la cuve à ondes est plus délicate pour cette partie car les observations sont plus difficiles.

**2** L'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  augmente quand la longueur d'onde augmente et diminue quand la taille de l'ouverture augmente, donc la seule relation possible est **b** :  $\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$ .

**3** La longueur d'onde correspondant à la fréquence moyenne des ondes sonores émises par l'orateur est  $\lambda = \frac{v_{\text{son}}}{f} = \frac{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{800 \text{ Hz}}$  ; soit  $\lambda = 4,31 \times 10^{-1} \text{ m}$ .

L'ouverture de la porte mesure 1,0 m ; le rapport  $\frac{\lambda}{a} \approx 2,3$ . Ces deux grandeurs sont du même ordre de grandeur. Le phénomène de diffraction se manifeste (doc. **C**). Il est donc possible d'entendre le discours sans voir l'orateur.

#### Un pas vers le cours

**4** Le phénomène de diffraction apparaît lorsqu'une onde mécanique ou électromagnétique passe au travers d'une ouverture de petite dimension. Il correspond à un changement de direction de l'onde. L'importance du phénomène de diffraction peut être mesurée à l'aide de l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$ .

## Activité 2

### expérimentale La diffraction d'une lumière monochromatique

p. 111

#### Capacités exigibles

- Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire.
- Mettre en œuvre des dispositifs permettant d'étudier les phénomènes de diffraction et d'interférences.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation de sources lumineuses.

#### Matériel :

- Rail.
- Laser rouge ou vert.
- Support élévateur.
- Fentes de différentes largeurs.
- Fente de largeur inconnue  $a$ .
- Écran.
- Règle.

#### Pratique expérimentale

**1** D'après le schéma **B**, on a :  $\tan \theta = \frac{\ell}{D} = \frac{\ell}{2 \times D}$ , et pour de petits angles exprimés en radian :  $\tan \theta = \theta$ .

La relation s'écrit donc :  $\theta = \frac{\ell}{2 \times D}$  (pour de petits angles exprimés en radian).

**2** Pour de petits angles exprimés en radian, la diffraction nous donne  $\theta = \frac{\lambda}{a}$  (COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE).

On peut écrire alors  $\frac{\ell}{2 \times D} = \frac{\lambda}{a}$  d'où  $a = \frac{2D \times \lambda}{\ell}$ .

• Une première méthode est une mesure unique de  $a$  relative à la fente inconnue, à partir de la relation  $a = \frac{2D \times \lambda}{\ell}$  ; la connaissance de  $\lambda$  et la mesure de  $D$  et de  $\ell$  permet de déterminer  $a$ .

• Une deuxième méthode est de mesurer la largeur de la tache centrale de diffraction pour différentes fentes de largeurs  $a$  connues. On construit ensuite la représentation graphique  $\ell = f\left(\frac{1}{a}\right)$  qui doit être modélisée par une fonction linéaire. On mesure ensuite la largeur  $\ell$  de la tache de diffraction pour la fente inconnue. L'exploitation de l'équation issue de la modélisation permet de calculer  $a$ .

On peut aussi utiliser la droite obtenue qui servira de droite d'étalonnage. On porte la largeur de la tache de diffraction sur la droite d'étalonnage ; la détermination graphique de  $\frac{1}{a}$  permet ensuite de calculer  $a$ .

Pour chacune des expériences, il faut placer l'écran à au moins 1 m de la fente afin d'améliorer la précision de la détermination et pour se placer dans les conditions de diffraction de Fraunhofer.

**3** Les atomes, qui constituent le cristal et qui sont situés dans des plans parallèles, jouent le rôle d'objet diffractant dans l'étude de la cristallographie aux rayons X.

### Un pas vers le cours

**4** Le phénomène de diffraction permet de déterminer une distance à l'échelle microscopique à partir de la largeur de la tache centrale de diffraction. Pour cela, on utilise la relation entre  $a$ ,  $D$ ,  $\lambda$  et  $\ell$  ou une représentation graphique judicieusement choisie.

## Activité 3

### expérimentale



Tâche complexe

## Les interférences lumineuses

p. 112

### Capacités exigibles

- Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.
- Mettre en œuvre des dispositifs permettant d'étudier les phénomènes de diffraction et d'interférences.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation de sources lumineuses.

### Investigation

#### 1 Étapes de la démarche de résolution :

**1<sup>re</sup> étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter**

1. L'interfrange  $i$  est la distance séparant les centres de deux franges brillantes consécutives ou les centres de deux franges sombres consécutives (COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE).

2. La relation qui relie l'interfrange  $i$ , la longueur d'onde  $\lambda$ , la distance  $b$  entre les fentes et la distance  $D$  entre les deux fentes et l'écran est donnée par :  $i = \frac{\lambda \times D}{b}$  (COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE).

**2<sup>e</sup> étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique**

La longueur d'onde de la lumière émise par le laser est-elle conforme à celle annoncée sur l'étiquette ?

**3<sup>e</sup> étape : Émettre une hypothèse permettant d'y répondre**

L'étude quantitative d'une figure d'interférences devrait permettre de mesurer assez précisément la longueur d'onde de la lumière émise par le laser.

**4<sup>e</sup> étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée**

**Liste du matériel :** laser, fentes d'Young, caméra, écran gradué, mètre (ou banc d'optique gradué), ordinateur avec logiciel de traitement d'images.

**Protocole :**

- Aligner le laser, les fentes d'Young et l'écran.
- Positionner la caméra de manière à obtenir l'image de la figure obtenue sur l'écran.
- Capter l'image.
- Mesurer la distance  $D$  entre les fentes d'Young et l'écran.
- Déterminer l'interfrange  $i$  en exploitant la capture avec le logiciel.
- Déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  de la radiation à partir de la relation :  $\lambda = \frac{i \times b}{D}$ .

**5<sup>e</sup> étape : Noter les observations, les interpréter et conclure**

On compare la longueur d'onde mesurée expérimentalement à celle indiquée sur l'étiquette du laser.

On contrôle sa conformité.

La photographie de la figure obtenue (image act3-interferences.jpg) est disponible au téléchargement.

**Ressource pour le professeur à télécharger :**  
Image act3-interferences.jpg

### Proposition de grille d'évaluation par compétence :

Compétences	Capacités attendues	A	B	C	D
<b>S'approprier</b>	Comprendre que la détermination de la longueur d'onde $\lambda$ dépend de la mesure de l'interfrange $i$ , de la distance entre les fentes $b$ et de la distance $D$ entre les fentes et l'écran.				
<b>Analyser-Raisonner</b>	– Choisir de mesurer l'interfrange $i$ à partir de la figure d'interférences et d'un logiciel de traitement d'images. – Utiliser un grand nombre de franges pour augmenter la précision de la mesure de $i$ .				
<b>Réaliser</b>	– Placer l'écran à une distance suffisamment grande de l'écran. – Placer correctement la caméra pour faire une capture sans déformation de la figure d'interférences. – Mesurer l'interfrange en utilisant la figure et les outils du logiciel. – Calculer la longueur d'onde de la radiation du laser.				
<b>Valider</b>	Conclure sur la longueur d'onde mesurée expérimentalement et celle indiquée sur l'étiquette du laser.				

## Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

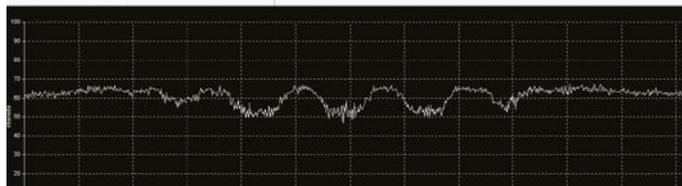
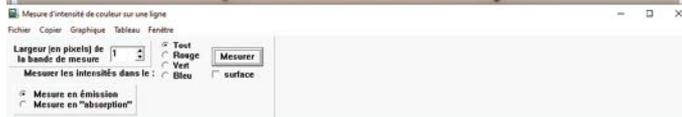
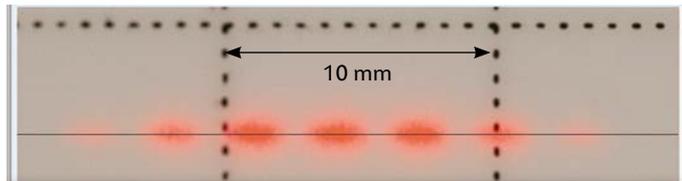
On peut proposer différents coups de pouce :

**Coup de pouce 1 :** la relation donnant l'interfrange  $i$  permet d'isoler la longueur d'onde  $\lambda$ .

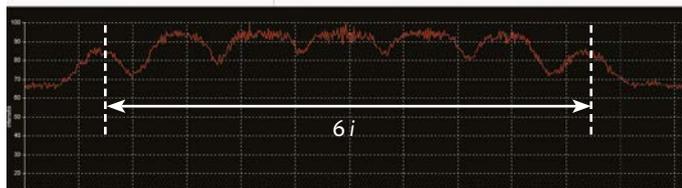
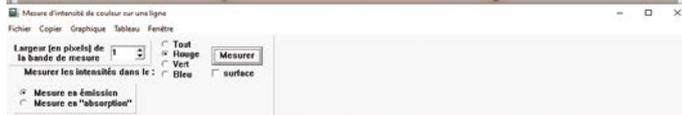
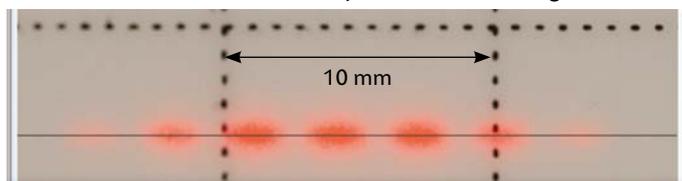
**Coup de pouce 2 :** on mesure l'interfrange à partir d'une capture d'écran de la figure d'interférences. Pour cela, l'image sera exploitée par un logiciel de traitement d'images.

**Coup de pouce 3 :** on mesure  $i$  en utilisant plusieurs franges à l'aide d'un logiciel comme *Mesurim*.

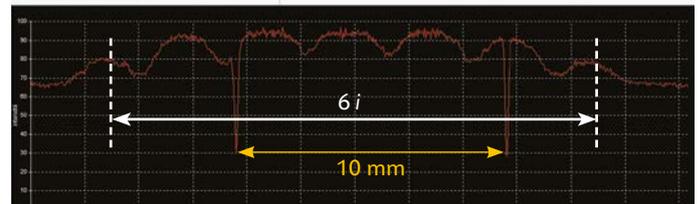
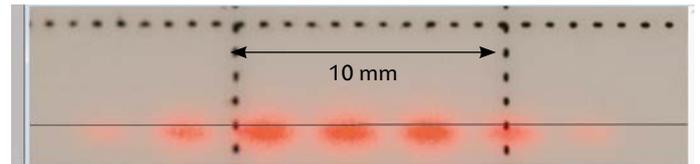
En mesurant l'intensité lumineuse le long d'une ligne sur l'ensemble des canaux RVB, on obtient des minima d'intensité pour les taches rouges :



En mesurant l'intensité lumineuse sur le canal R uniquement, on obtient des maxima d'intensité pour les taches rouges :



Si on aligne la ligne de mesure avec les repères d'échelle, on obtient des minima pour ces repères. Cela permet de vérifier la bonne définition de l'échelle sur le logiciel :



Exemple de résultats obtenus pour  $D = 140$  cm,  $b = 0,30$  mm et avec  $6i = 17,9$  mm.

$$\text{Cela conduit à } i = \frac{17,9 \text{ mm}}{6} = 2,98 \text{ mm.}$$

**Coup de pouce 4 :** on détermine la longueur d'onde en faisant attention aux unités :  $\lambda = \frac{i \times b}{D}$ .

$$\text{Donc } \lambda = \frac{2,98 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,30 \times 10^{-3} \text{ m}}{1,40 \text{ m}} = 6,4 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

**Remarque :** il est souvent difficile de connaître *a priori* par des données du constructeur la longueur d'onde d'une diode laser rouge qui est peu monochromatique.



On peut utiliser un spectrophotomètre correctement étalonné pour déterminer la longueur d'onde.

### Un pas vers le cours

**2** La longueur d'onde d'une radiation peut être déterminée à partir du phénomène d'interférences. La mesure de l'interfrange et l'exploitation de la relation entre  $i$ ,  $\lambda$ ,  $b$  et  $D$  permet d'isoler et de calculer la longueur d'onde.

## Capsule vidéo de cours : Différence de chemin optique

### QCM

1. A, B et C ; 2. C ; 3. A et C ; 4. C ; 5. B ; 6. A, B et C ; 7. B ; 8. B et C ; 9. A et C ; 10. B.

p. 117

### Exercices

#### Appliquer le cours

p. 120

#### 3 Identifier le phénomène de diffraction (1)

Lorsqu'un laser éclaire une fente de petite taille, on observe le phénomène de diffraction. Il apparaît sur l'écran une tache lumineuse (nommée tache centrale) et des taches moins larges réparties de part et d'autre de la tache centrale.

#### 4 Identifier le phénomène de diffraction (2)

Le phénomène de diffraction intervient dans la situation **a**.

#### 5 Illustrer le phénomène de diffraction

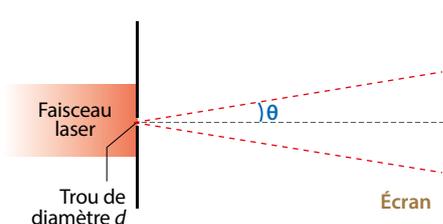
On peut observer des phénomènes de diffraction avec des vagues qui pénètrent dans un port protégé par des digues, en acoustique avec une personne que l'on entend derrière une porte entrouverte, en optique avec la lumière sur un CD ou la lumière à travers un rideau, etc.

## 6 Connaître un phénomène

Lorsqu'un mur antibruit présente une petite ouverture, il y a un phénomène de diffraction. Les riverains peuvent alors entendre le bruit de la circulation.

## 7 Calculer un angle caractéristique de diffraction

1.



On obtient des anneaux de diffraction avec une tache centrale nettement plus lumineuse que les autres.

2. L'angle caractéristique de diffraction est :

$$\theta = 1,22 \times \frac{\lambda}{a} \text{ d'où } \theta = 1,22 \times \frac{532 \times 10^{-9} \text{ m}}{30 \times 10^{-6} \text{ m}} ;$$

soit  $\theta = 2,2 \times 10^{-2} \text{ rad}$ .

## 8 Exploiter l'angle caractéristique de diffraction

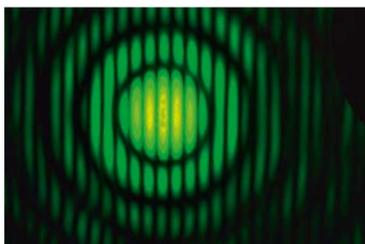
$\theta$ ( $10^{-3} \text{ rad}$ )	0,50	0,82
$\lambda$ (nm)	$1,3 \times 10^4$	1,7
$a$ (cm)	2,7	$2,1 \times 10^{-4}$

## 9 Reconnaître le phénomène d'interférences

Le phénomène d'interférences intervient dans le cas **a** ; on a des interférences destructives.

## 10 Décrire un phénomène d'interférences

- Le phénomène observé est le phénomène d'interférences.
- On observe des franges d'interférences équidistantes disposées au sein de la figure de diffraction d'un trou circulaire (anneaux concentriques) comme ci-dessous par exemple.



Le phénomène d'interférences est le plus visible au niveau de la tache centrale.

## 11 Reconnaître des ondes

1. Pour observer un phénomène d'interférences, il faut deux sources en phase.

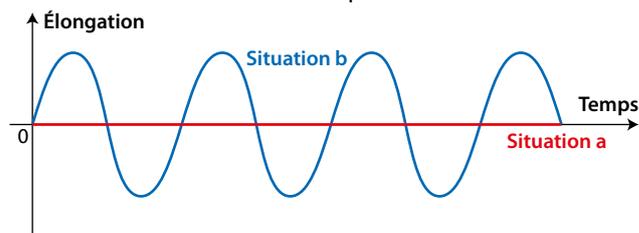
2. Le flotteur (A) est sur une frange où l'amplitude varie beaucoup lors de la propagation des ondes (alternance de zones colorées en bleu et d'autres en noir). L'élongation de l'onde résultante est maximale ; les interférences sont constructives. Cette situation correspond à la courbe (a).

Le flotteur (B) est sur une frange où l'amplitude ne varie pas lors de la propagation des ondes (zone colorée en gris). L'élongation de l'onde résultante est petite ; les interférences sont destructives. La surface de l'eau est quasiment immobile. Cette situation correspond à la courbe (b).

## 12 Reconnaître des signaux en phase ou en opposition de phase

1. Les ondes sont en opposition de phase dans la situation (a) et en phase dans la situation (b).

2. Les ondes résultantes dans chaque situation sont :



## 13 Connaître le phénomène d'interférences

1. Pour observer des interférences, il faut que les deux ondes lumineuses qui se superposent proviennent de deux sources ponctuelles en phase.

2. a. Pour observer des interférences constructives, la différence de chemin optique doit être telle que :

$$\Delta L = k \times \lambda_0 \text{ où } k \text{ est un entier relatif.}$$

b. Pour observer des interférences destructives, la différence de chemin optique doit être telle que :

$$\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0.$$

## 14 Déterminer la position des franges brillantes et des franges sombres

1. Au point O, la différence de chemin optique est  $\Delta L = 0$  ; on a donc une condition d'interférences constructives ( $\Delta L = k \times \lambda_0$  avec  $k = 0$ ). On observera donc une frange brillante.

2. Au point P, on a  $\Delta L = 1,625 \mu\text{m}$ .

On calcule  $\frac{\Delta L}{\lambda_0} = \frac{1,625 \times 10^{-6} \text{ m}}{650 \times 10^{-9} \text{ m}}$  soit  $\frac{\Delta L}{\lambda_0} = 2,5$ , ce qui correspond à un nombre demi-entier.

Donc  $\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0$  avec  $k = 2$ . Les interférences sont destructives et on observe une frange sombre.

## 15 Calculer une longueur d'onde

1. La longueur d'onde a pour expression :

$$\lambda = \frac{i \times b}{D}.$$

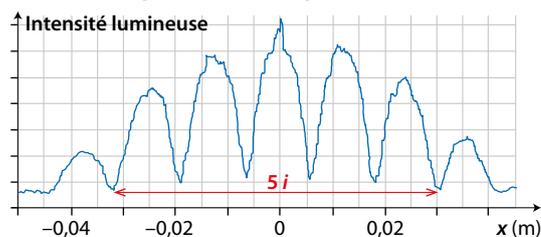
2. On a :  $\lambda = \frac{i \times b}{D}$

$$\lambda = \frac{6,3 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,20 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,0 \text{ m}}$$

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

## 16 Calculer un interfrange

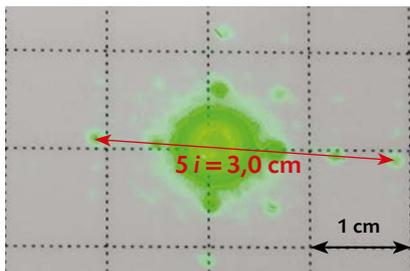
On mesure sur la figure l'interfrange  $i$ .



On a :  $5i = (0,031 \text{ m} - (-0,032 \text{ m})) = 0,063 \text{ m}$  d'où  $i = 13 \text{ mm}$ .

**17 Mesure de la taille d'un pixel d'un écran de smartphone**

1. L'interfrange  $i$  est obtenu à partir de la figure d'interférences :



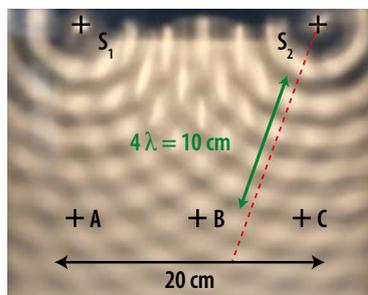
On a :  $5i = 3,0$  cm d'où  $i = 0,60$  cm.

2. La largeur d'un pixel est  $a = \frac{\lambda \times D}{i}$ .

Donc  $a = \frac{532 \times 10^{-9} \text{ m} \times 1,24 \text{ m}}{0,60 \times 10^{-2} \text{ m}}$  soit  $a = 1,1 \times 10^{-4}$  m. La largeur d'un pixel est environ 0,11 mm.

**18 Interférence à la surface de l'eau**

1.



Sur la photographie, on constate que, suivant une direction de propagation, la longueur égale à  $4\lambda$  correspond à la moitié de la longueur de l'échelle indiquée. Donc  $4\lambda = 10$  cm ; donc  $\lambda = 2,5$  cm.

2. En un point M quelconque du milieu, on note  $d_1 = S_1M$  et  $d_2 = S_2M$ .

Pour observer des interférences constructives, il faut que :  $d_2 - d_1 = k \times \lambda$ .

Pour observer des interférences destructives, il faut que :

$$d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda.$$

Au point A,  $d_2 - d_1 = 9,2$  cm. On a  $\frac{d_2 - d_1}{\lambda} \approx 3,5$ , ce qui correspond

à des interférences destructives car  $d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$ .

Au point B,  $d_2 - d_1 = 0$  cm. On a des interférences constructives pour  $k = 0$ .

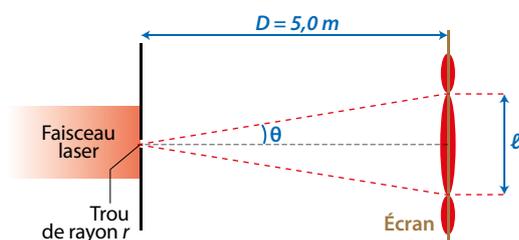
Au point C,  $d_2 - d_1 = -7,7$  cm. On a  $\frac{d_2 - d_1}{\lambda} \approx -3$ , ce qui correspond

à des interférences constructives car  $d_2 - d_1 = k \times \lambda$ .

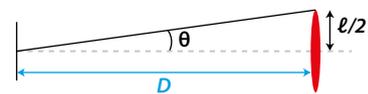
**19 Connaître les critères de réussite**

**Pointeur laser**

1.



2. L'expression de l'angle caractéristique  $\theta$  s'obtient à partir de la tache centrale de largeur (diamètre)  $\ell$ .



D'après le schéma, on a :  $\tan \theta = \frac{\ell/2}{D} = \frac{\ell}{2D}$  ; pour de petits angles

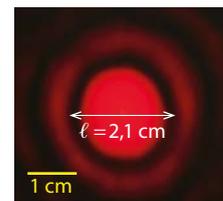
exprimés en radian,  $\tan \theta = \theta$  d'où  $\theta = \frac{\ell}{2D}$ .

De plus, pour une ouverture circulaire de rayon  $r$  et une longueur d'onde  $\lambda_R$ , on a :

$$\theta = 1,22 \times \frac{\lambda_R}{2r}.$$

On obtient alors  $\frac{\ell}{2D} = 1,22 \times \frac{\lambda_R}{2r}$ . L'expression de la longueur d'onde est  $\lambda_R = \frac{r \times \ell}{1,22 D}$ .

3.



On relève à partir de l'échelle de la photographie :  $\ell = 2,1$  cm.

La longueur d'onde des radiations émises par la diode laser est donc :

$$\lambda_R = \frac{0,20 \times 10^{-3} \text{ m} \times 2,1 \times 10^{-2} \text{ m}}{1,22 \times 5,0 \text{ m}}, \lambda_R = 6,9 \times 10^{-7} \text{ m}$$

soit  $\lambda_R \approx 690$  nm.

4. a. La longueur d'onde 405 nm correspond à des radiations violettes.

b. La largeur de la tache centrale est donnée par la relation

$\ell = 2,44 \times \frac{\lambda \times D}{2r}$  et on a  $\lambda < \lambda_R$ , donc  $\ell < \ell_R$ . La largeur de la

tache centrale sera plus petite avec un pointeur laser émettant des radiations de longueur d'onde  $\lambda$ .

**20 À chacun son rythme**

**Les effets de la houle**

1. La longueur d'onde de la houle est  $\lambda = 30$  m ; la taille de l'ouverture est  $a = 40$  m.

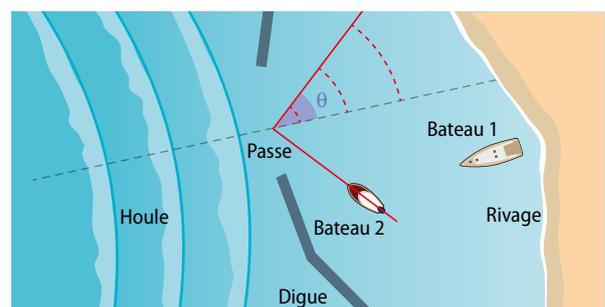
2. a. Le phénomène de diffraction est pris en compte si la longueur d'onde de la houle et la taille de l'ouverture sont du même ordre de grandeur, ce qui est le cas ici. On peut donc prendre en compte le phénomène de diffraction.

b. L'angle caractéristique de diffraction est donné par

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{30 \text{ m}}{40 \text{ m}}.$$

Donc  $\sin \theta = \frac{30 \text{ m}}{40 \text{ m}} = 0,75$ , ce qui conduit à  $\theta = 49^\circ$ .

c. On trace l'angle caractéristique de diffraction sur le schéma :



3. Le bateau 2 est sur la ligne d'extinction, il est mieux protégé que le bateau 1.

## 21 Interfrange et longueur d'onde

1. a. La longueur d'onde  $\lambda_0$  de la radiation émise par le laser est :

$$\lambda_0 = \frac{i \times b}{D}$$

$$\lambda_0 = \frac{6,0 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,20 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,00 \text{ m}}$$

$$\lambda_0 = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m} \text{ soit } \lambda = 600 \text{ nm}.$$

L'incertitude-type sur la longueur d'onde est :

$$u(\lambda_0) = \lambda_0 \times \sqrt{\left(\frac{u(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{u(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}$$

$$u(\lambda_0) = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m} \times \sqrt{\left(\frac{0,1 \text{ mm}}{6,0 \text{ mm}}\right)^2 + \left(\frac{0,01 \text{ mm}}{0,20 \text{ mm}}\right)^2 + \left(\frac{0,01 \text{ m}}{2,00 \text{ m}}\right)^2}$$

$$u(\lambda_0) = 4 \times 10^{-8} \text{ m}.$$

2. L'encadrement de la longueur d'onde est :

$$5,6 \times 10^{-7} \text{ m} < \lambda_0 < 6,4 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

## 22 Lecture d'un disque optique Blu-Ray

1. Les interférences sont constructives si la différence de distances parcourues par les deux ondes est telle que  $d_2 - d_1 = k \times \lambda$  où  $k$  est un entier relatif.

Les interférences sont destructives si la différence de distances parcourues par les deux ondes est telle que  $d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$ .

2. a. Dans le cas (a), les deux rayons (1) et (2) parcourent la même distance dans le même milieu de propagation ; la différence de distances parcourues  $d_2 - d_1$  entre ces deux rayons est donc nulle. Les interférences entre les rayons (1) et (2) sont donc constructives.

b. Dans le cas (b), la différence de distances parcourues entre les deux rayons est  $d_2 - d_1 = 2h$  ;  $h$  correspond à la distance entre un creux et un plat, donc cela correspond à la profondeur d'un creux. Si les interférences sont destructives, alors :

$$\left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \frac{\lambda_0}{n} = 2h.$$

$$\text{La valeur de } h \text{ est } h = \frac{\left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0}{2n}.$$

La valeur minimale est obtenue pour  $k = 0$  ; d'où :

$$h_{\min} = \frac{\lambda_0}{2n} = \frac{405 \times 10^{-9} \text{ m}}{2 \times 1,55} = 6,53 \times 10^{-8} \text{ m}.$$

## 23 Wavelength influence on diffraction

Traduction : Au cours d'une expérience de diffraction, l'image (a) a été obtenue. En changeant simplement le laser, on a obtenu l'image (b).

1. À quelle image correspond le laser de plus grande longueur d'onde ?

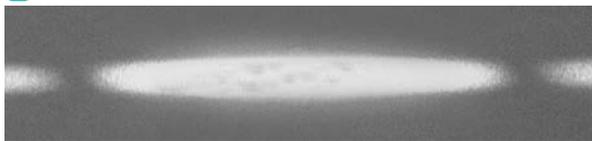
2. La longueur d'onde de la lumière émise par l'un des lasers est de 650 nm et les deux lasers émettent un rayonnement dans la zone visible. Quelle est la longueur d'onde du deuxième laser ?

Réponses :

1. (a)



(b)



L'angle de diffraction étant petit, on a  $\frac{\lambda}{a} = \frac{\ell}{2D}$ .

Pour  $a$  et  $D$  fixes, la largeur de la tache centrale de diffraction augmente avec la longueur d'onde. C'est donc le cliché (b) qui se rapporte au laser de plus grande longueur d'onde.

2. On a  $\frac{\lambda}{\ell} = \frac{a}{2D} = \text{constante}$  ( $a$  et  $D$  fixes) ; on peut donc écrire

$$\frac{\lambda_R}{\ell_R} = \frac{\lambda_i}{\ell_i} \text{ où } \lambda_R \text{ se rapporte au laser du cliché (a) correspondant}$$

à 650 nm et  $\lambda_i$  correspondant à la longueur d'onde inconnue.

On mesure sur les figures :  $\ell_R = 2,4 \text{ cm}$  et  $\ell_i = 2,0 \text{ cm}$ .

$$\text{La longueur d'onde } \lambda_i \text{ est } \lambda_i = \ell_i \times \frac{\lambda_R}{\ell_R}$$

$$\text{Donc } \lambda_i = 2,0 \text{ cm} \times \frac{650 \text{ nm}}{2,4 \text{ cm}} \text{ soit } \lambda_i = 5,4 \times 10^2 \text{ nm}.$$

## 24 Couleurs interférentielles des paons

1. Les interférences sont constructives si le déphasage  $\Delta\Phi$  entre les deux rayons est un multiple pair de  $\pi$  :  $\Delta\Phi = p \times \pi$  où  $p$  est un entier relatif pair.

Les interférences sont destructives si le déphasage  $\Delta\Phi$  entre les deux rayons est un multiple impair de  $\pi$  :  $\Delta\Phi = (2p + 1) \times \pi$  où  $p$  est un entier relatif.

Donc si  $\Delta\Phi = 2\pi$ , les interférences sont constructives.

Et si  $\Delta\Phi = 3\pi$ , les interférences sont destructives.

2. a. Pour une radiation de longueur d'onde dans l'air  $\lambda_{\text{OR}}$ , le déphasage  $\Delta\varphi_R$  des deux ondes est :

$$\Delta\varphi_R = \frac{4\pi \times n_R \times e \times \cos r}{\lambda_{\text{OR}}} + \pi.$$

$$\text{Donc } \Delta\varphi_R = \frac{4\pi \times 1,33 \times 0,15 \times 10^{-6} \text{ m} \times \cos(20^\circ)}{750 \times 10^{-9} \text{ m}} + \pi \text{ soit } \Delta\varphi_R \text{ proche de } 2\pi.$$

On a  $\frac{\Delta\varphi_R}{\pi} = 2$  qui correspond à un nombre entier pair ( $p = 2$ ) ;

les interférences de deux rayons sont donc constructives.

Pour une radiation de longueur d'onde  $\lambda_{\text{OV}}$ , le déphasage  $\Delta\varphi_V$  des deux ondes est :

$$\Delta\varphi_V = \frac{4\pi \times n_V \times e \times \cos r}{\lambda_{\text{OV}}} + \pi$$

$$\Delta\varphi_V = \frac{4\pi \times 1,33 \times 0,15 \times 10^{-6} \text{ m} \times \cos 20^\circ}{380 \times 10^{-9} \text{ m}} + \pi$$

soit  $\Delta\varphi_V$  proche de  $3\pi$ .

On a  $\frac{\Delta\varphi_V}{\pi} = 3$  qui correspond à un nombre entier impair ( $2p + 1 = 3$  avec  $p = 1$ ). Les interférences sont donc destructives.

b. L'observateur percevra le rouge car pour le rouge les interférences sont constructives.

3. Si on change l'angle d'observation, on modifie le déphasage. Par conséquent, les conditions d'interférences constructives ou destructives n'auront plus lieu pour les mêmes radiations. Les couleurs perçues seront alors changeantes.

## 25 Résolution de problème

### Cuve à ondes

1<sup>re</sup> étape : S'approprier la question posée

- Quel est l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  ?
- Comment représenter la figure de diffraction après l'ouverture ?

2<sup>e</sup> étape : Lire et comprendre les documents

- Le texte d'introduction donne les valeurs numériques nécessaires (fréquence, célérité, taille de l'ouverture).
- Le doc. (A) permet de visualiser les ondes progressives périodiques.

• Le doc. **B** nous renseigne sur les caractéristiques des ondes diffractées (forme, longueur d'onde).

### 3<sup>e</sup> étape : Dégager la problématique

La question telle qu'elle est formulée est la problématique. Il n'y a pas de reformulation.

### 4<sup>e</sup> étape : Construire la réponse

- Calculer la longueur d'onde  $\lambda$  des ondes progressives périodiques.
- Calculer l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$ .
- Représenter, le plus précisément possible, la figure de diffraction après l'ouverture.

### 5<sup>e</sup> étape : Répondre

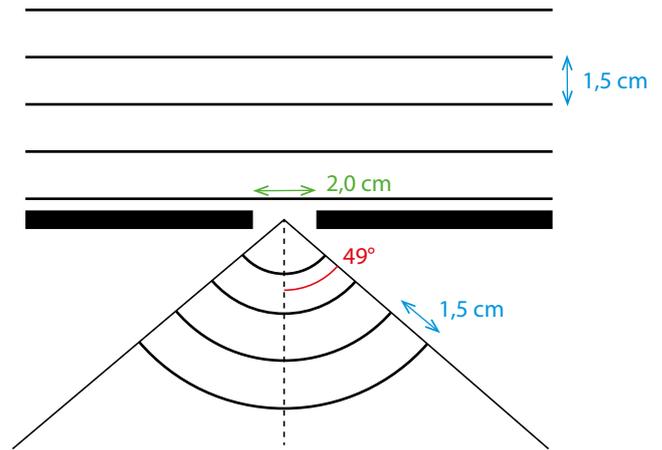
La longueur d'onde des ondes progressives périodiques à la surface de l'eau est :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{30 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{20 \text{ s}^{-1}} = 1,5 \times 10^{-2} \text{ m}.$$

L'angle caractéristique de diffraction est tel que :  $\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$  donc  $\sin \theta = \frac{1,5 \times 10^{-2} \text{ m}}{2,0 \times 10^{-2} \text{ m}}$  soit  $\sin \theta = 0,75$ .

Donc  $\theta = 49^\circ$ .

On représente la figure de diffraction ci-dessous :



## Vers le Bac

p. 125

### Préparation à l'écrit

#### 26 Observation d'une exoplanète

##### Partie I

1. Pour observer séparément l'étoile et la planète, il faut que les deux taches de diffraction ne se recouvrent pas ; pour cela l'écart angulaire  $\alpha$  doit être supérieur à l'angle caractéristique de diffraction  $\theta_{\text{diff}}$ .

2. Pour distinguer la planète 2M1207b de l'étoile 2M1207a, il faut que  $\alpha > \theta_{\text{diff}}$  d'où :

$$\frac{r}{d_{\text{Terre-étoile}}} > 1,22 \times \frac{\lambda}{D} \text{ soit } D > \frac{1,22 \times \lambda \times d_{\text{Terre-étoile}}}{r}.$$

$$\text{On obtient } D > \frac{1,22 \times 2,0 \times 10^{-6} \text{ m} \times 230 \times 9,461 \times 10^{15} \text{ m}}{55 \times 1,496 \times 10^{11} \text{ m}}.$$

Soit  $D > 0,65 \text{ m}$ . Le diamètre  $D$  de l'ouverture du télescope doit être supérieur à  $0,65 \text{ m}$ .

##### Partie II

1. a. Les rayons issus de l'étoile arrivent en phase sur les télescopes. Les interférences sont donc constructives.

b. Un retard de propagation d'une demi-période  $\frac{T}{2}$  sur la durée du parcours du signal provenant du télescope 2 est équivalent à un allongement d'une distance  $d_2 - d_1 = c \times \frac{T}{2}$ . Or, la longueur d'onde  $\lambda$  a pour expression  $\lambda = c \times T$  d'où  $d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{2}$ . Les ondes

sont en opposition de phase, leurs interférences sont destructives.

c. L'intensité du signal issu de l'étoile sera minimale.

2. a. Le signal lumineux provenant de l'exoplanète arrive sur le télescope 2 avec un retard  $\tau = \frac{d \times \sin \alpha}{c}$ . De plus, le système optique ajoute un retard d'une demi-période  $\frac{T}{2}$  sur le signal provenant

de ce télescope. Le retard total est donc  $\tau' = \frac{d \times \sin \alpha}{c} + \frac{T}{2}$  par rapport au signal issu du premier télescope.

b. Pour avoir des interférences constructives, il faut que le retard  $\tau'$  corresponde à un multiple de la période  $T$  :  $\tau' = k \times T$ .

3. On obtient :  $\frac{d \times \sin \alpha}{c} + \frac{T}{2} = k \times T$  soit  $\frac{d \times \sin \alpha}{c} = k \times T - \frac{T}{2}$ .

Il vient  $d \times \sin \alpha = c \times T \times \left(k - \frac{1}{2}\right)$  d'où :

$$d \times \sin \alpha = c \times T \times \left(k - \frac{1}{2}\right).$$

Avec  $\lambda = c \times T$ , la relation devient :

$$d \times \sin \alpha = \left(k - \frac{1}{2}\right) \times \lambda.$$

4. L'expression précédente peut s'écrire :

$$d \times \frac{r}{d_{\text{Terre-étoile}}} = \left(k - \frac{1}{2}\right) \times \lambda$$

$$\text{soit } d = \frac{d_{\text{Terre-étoile}}}{r} \times \left(k - \frac{1}{2}\right) \times \lambda.$$

Pour que la distance soit minimale, on prend  $k = 1$ .

On en déduit la distance minimale  $d$  entre les deux télescopes :

$$d = \frac{1}{2} \times \frac{d_{\text{Terre-étoile}}}{r} \times \lambda.$$

$$\text{Il vient } d = \frac{1}{2} \times \frac{230 \times 9,461 \times 10^{15} \text{ m}}{55 \times 1,496 \times 10^{11} \text{ m}} \times 10 \times 10^{-6} \text{ m}$$

soit  $d = 1,3 \text{ m}$  entre les deux télescopes.

#### 27 Les fentes d'Young

1. Pour observer une telle figure, c'est-à-dire des interférences stables, il faut avoir des ondes issues de sources ponctuelles en phase que l'on obtient expérimentalement, à l'aide d'ouvertures éclairées par une même source. C'est le cas du dispositif des fentes d'Young.

2. L'interfrange est :

$$i = \frac{\lambda_0 \times D}{b} = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m} \times 1,50 \text{ m}}{0,20 \times 10^{-3} \text{ m}} = 4,9 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

$$\text{On a : } \frac{L}{i} = \frac{10 \times 10^{-2} \text{ m}}{4,9 \times 10^{-3} \text{ m}} = 20..$$

Le nombre maximal de franges brillantes sur l'écran est 20.

# 8

## La lumière : un flux de photons

### Programme officiel

#### Ondes et signaux

2. Former des images, décrire la lumière par un flux de photons	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<b>B) Décrire la lumière par un flux de photons</b>	
<p>Le photon : énergie, vitesse, masse. Effet photoélectrique. Travail d'extraction.</p> <p>Absorption et émission de photons. Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.</p>	<p>Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique. Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière. Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence. Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.</p> <p>Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.). <i>Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.</i></p>

### Liens avec le programme officiel de seconde et de première (enseignement de spécialité)

Vocabulaire associé	Connaissances et savoir-faire	Modèles / Relations
<b>SECONDE</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Vitesse de propagation de la lumière dans le vide ou dans l'air.</li> <li>Longueur d'onde dans le vide ou dans l'air.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Citer la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide ou dans l'air et la comparer à d'autres valeurs de vitesses couramment rencontrées.</li> <li>Caractériser un rayonnement monochromatique par sa longueur d'onde dans le vide ou dans l'air.</li> </ul>	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spectre de la lumière, association d'une radiation à une longueur d'onde.</li> </ul>
<b>PREMIÈRE</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Domaines des ondes électromagnétiques.</li> <li>Relation entre longueur d'onde, célérité de la lumière et fréquence.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliser une échelle de fréquences ou de longueurs d'onde pour identifier un domaine spectral.</li> <li>Citer l'ordre de grandeur des fréquences ou des longueurs d'onde des ondes électromagnétiques utilisées dans divers domaines d'application (imagerie médicale, optique visible, signaux wifi, micro-ondes, etc.).</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Le photon. Énergie d'un photon.</li> <li>Description qualitative de l'interaction lumière-matière : absorption et émission.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliser l'expression donnant l'énergie d'un photon.</li> <li>Exploiter un diagramme de niveaux d'énergie en utilisant les relations <math>\lambda = \frac{c}{\nu}</math> et <math>\Delta E = h \times \nu</math>.</li> </ul>	<p>Modèle corpusculaire de la lumière : le photon.</p>
Puissance et énergie.		
Rendement d'un convertisseur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Définir le rendement d'un convertisseur.</li> <li>Évaluer le rendement d'un dispositif.</li> </ul>	

## Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

La valeur de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide ou dans l'air doit être connue par les élèves depuis la classe de seconde, aussi elle ne sera indiquée ni dans les activités, ni dans les exercices.

Vu en première

## La lumière

p. 128

### Réactiver ses connaissances

#### Capsule vidéo : Interpréter et prévoir des spectres

- La fréquence de cette radiation est donnée par  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  donc  $\nu = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{505 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5,94 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .
- L'énergie transportée par chacun des photons de cette radiation est :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

Diagramme illustrant la relation  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$ . Les unités sont indiquées :  $h$  en  $\text{J} \cdot \text{s}$ ,  $\nu$  en  $\text{Hz}$ ,  $c$  en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\lambda$  en  $\text{m}$ , et  $\mathcal{E}_{\text{photon}}$  en  $\text{J}$ .

$$\text{Donc } \mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{505 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 3,94 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

3. Le spectre est un spectre d'émission. Lors de l'émission d'un photon l'énergie de l'atome diminue. La transition mise en jeu est donc la transition (a).

4. Le spectre d'absorption de l'hélium sera constitué de raies noires sur fond coloré. Les raies noires correspondent à des radiations de même longueur d'onde que les radiations associées aux raies colorées du spectre d'émission.

### Flash test

1. B ; 2. B et C ; 3. B ; 4. A

## Activité 1

### documentaire L'effet photoélectrique

p. 129

#### Capacités exigibles

- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique.
- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.
- Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence.

#### Analyse des documents

- Le rayonnement lumineux provoque le rapprochement des feuilles conductrices de l'électroscope. Ce rayonnement provoque donc une diminution de la valeur absolue de la charge électrique portée par les feuilles. Comme l'électroscope et la plaque de zinc sont initialement chargés négativement, ils portent un excès d'électrons. Le rayonnement fait donc diminuer le nombre d'électrons excédentaires.
- L'énergie du photon incident est en partie utilisée pour arracher l'électron. L'excès se retrouve sous forme d'énergie cinétique de l'électron arraché. On a donc  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = \mathcal{E}_{\text{arrachement}} + \mathcal{E}_{\text{cinétique}}$ . En notant  $W_{\text{extraction}}$  l'énergie nécessaire pour arracher un électron, on a  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{\text{cinétique}}$ .
- La longueur d'onde d'une radiation UV est plus petite que celle d'une radiation visible. Un photon d'une radiation UV transporte donc davantage d'énergie qu'un photon d'une radiation visible. Cette plus grande énergie permet aux radiations UV d'arracher des électrons aux métaux contrairement aux radiations visibles.
- $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{\text{cinétique}}$  donc  $\mathcal{E}_{\text{cinétique}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$  soit  $\frac{1}{2} m_e \times v^2 = h \times \frac{c}{\lambda} - W_{\text{extraction}}$ .

$$\text{Il vient donc } v = \sqrt{\frac{2 \left( h \times \frac{c}{\lambda} - W_{\text{extraction}} \right)}{m_e}} \quad \text{soit } v = \sqrt{\frac{2 \left( 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{300 \times 10^{-9} \text{ m}} - 3,63 \text{ eV} \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1} \right)}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$\text{soit } v = 4,25 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

**Remarque :** cette valeur de vitesse est en fait la valeur maximale de la vitesse des électrons. C'est la valeur de la vitesse lors de l'extraction d'électrons proches de la surface du métal. Lorsque des électrons éloignés de la surface sont arrachés, l'énergie pour les extraire est supérieure à  $W_{\text{extraction}}$ . L'énergie cinétique et la vitesse de ces électrons extraits sont alors plus petites que celles calculées ici.

### Un pas vers le cours

- Lors de l'effet photoélectrique, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à un métal.

## Activité 2

### expérimentale Rendement d'une cellule photovoltaïque ..... p. 130

#### Capacités exigibles

- Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.
- Utiliser un multimètre, adapter le calibre si nécessaire.
- Réaliser un montage électrique conformément à un schéma électrique normalisé.
- Utiliser un luxmètre ou une photorésistance.
- Utiliser une cellule photovoltaïque.

#### Matériel :

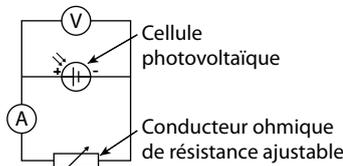
- Cellule photovoltaïque.
- Conducteur ohmique de résistance ajustable.
- Voltmètre.
- Ampèremètre.
- Fils de connexion.
- Lampe pour laquelle le facteur de conversion des lux en  $W \cdot m^{-2}$  est connu\*.
- Luxmètre.

\* Le facteur de conversion peut être déterminé avant ou pendant la séance avec un pyranomètre qui donne la puissance surfacique en  $W \cdot m^{-2}$ .

Un pyranomètre suffit par classe. On trouve actuellement des pyranomètres pour environ 300 €.

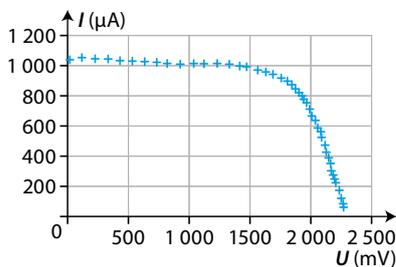
#### Pratique expérimentale

1 Pour représenter la caractéristique intensité – tension  $I=f(U)$  d'une cellule photovoltaïque, il faut réaliser un montage permettant de faire varier  $I$  et  $U$  pour un éclairement connu.



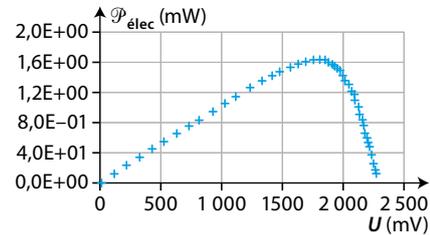
La cellule photovoltaïque sera éclairée par une lampe. Un luxmètre placé à la même distance de la lampe que la cellule, et orienté comme elle, permet de mesurer l'éclairement de la lampe.

Exemple de résultats obtenus avec une cellule de  $4,6 \text{ cm} \times 4,6 \text{ cm}$  et une puissance surfacique égale à  $65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  :



2 La puissance (en watt) est obtenue en multipliant la tension (en volt) par l'intensité (en ampère).

Exemple de résultats obtenus avec une cellule de  $4,6 \text{ cm} \times 4,6 \text{ cm}$  et une puissance surfacique égale à  $65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  :



3 Le rendement est donné par  $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$ .

La puissance électrique maximale obtenue est  $\mathcal{P}_{\text{elec}} = 1,64 \text{ mW}$ . Les mesures permettant d'obtenir les courbes précédentes ont été réalisées avec une cellule de surface :

$$S = 4,6 \text{ cm} \times 4,6 \text{ cm} = 21 \text{ cm}^2 \text{ soit } 2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

La lampe utilisée pour ces mesures, placée à 25 cm de la cellule, fournit une puissance surfacique de  $65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (mesurée avec un pyranomètre).

La puissance lumineuse reçue est donc :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,4 \times 10^{-1} \text{ W} = 1,4 \times 10^2 \text{ mW}.$$

Le rendement maximal est donc :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{1,64 \text{ mW}}{1,4 \times 10^2 \text{ mW}} = 0,012 \text{ soit } 1,2 \%$$

**Remarque :** l'éclairement mesuré simultanément avec un luxmètre était 1 945 lux. Le facteur de conversion correspondant aux conditions de cette mesure est donc  $\frac{65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1\,945 \text{ lux}} = 0,033 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / \text{lux}$ .

Ce facteur de conversion peut fortement varier d'une lampe à l'autre. Pour que les mesures aient du sens, sa détermination à l'aide d'un pyranomètre est indispensable.

4 D'après le doc. A, la température a une influence importante sur le rendement des cellules photovoltaïques : pour un éclairement donné, plus la température est grande et plus le rendement est faible.

Le lac permet de limiter l'élévation de la température lorsque les cellules sont fortement éclairées par le Soleil. Cela augmente le rendement de conversion.

#### Un pas vers le cours

5 Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport de la puissance (ou l'énergie) électrique fournie à la puissance (ou

$$\text{l'énergie) lumineuse reçue : } \eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}.$$

#### Capsule vidéo de cours : Bilan énergétique de l'effet photoélectrique

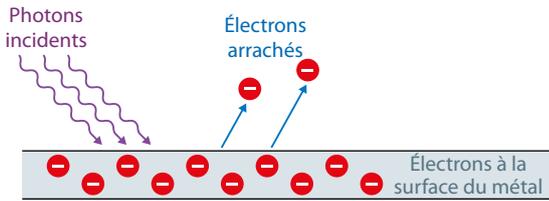
#### QCM

1. C ; 2. C ; 3. A ; 4. B ; 5. B ; 6. A ; 7. B ; 8. C.

p. 135

**3** Connaître l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est le phénomène d'éjection d'électrons d'un métal sous l'effet de radiations lumineuses.



**4** Décrire l'effet photoélectrique

- | Métal        | Fréquence (Hz)        | Longueur d'onde (nm) |
|--------------|-----------------------|----------------------|
| Plomb Pb     | $1,02 \times 10^{15}$ | 294                  |
| Potassium K  | $5,52 \times 10^{14}$ | 543                  |
| Magnésium Mg | $8,82 \times 10^{14}$ | 340                  |
- Pour que l'effet photoélectrique se produise quel que soit le métal, il faut utiliser des radiations de longueur d'onde suffisamment petite, donc des UV ( $\lambda \leq 294$  nm).

**5** Interpréter l'effet photoélectrique

- Des électrons sont arrachés au zinc métallique, ce qui entraîne un déficit de charges négatives et donc un excès de charges positives.
- L'énergie d'un photon est donnée par :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ (en J)} = \frac{h \text{ (en J}\cdot\text{s)} \times c \text{ (en m}\cdot\text{s}^{-1})}{\lambda \text{ (en m)}}$$

Cela conduit à :

$\lambda$ (nm)	$\mathcal{E}_{\text{photon}}$ (J)
330	$6,03 \times 10^{-19}$
400	$4,97 \times 10^{-19}$

- La radiation de longueur d'onde  $\lambda_2 = 400$  nm ne permet pas à la plaque de zinc de se charger positivement car aucun photon ne possède une énergie suffisante pour arracher un électron à la surface du métal.

**6** Expliquer l'effet photoélectrique

- Ces quanta de lumière sont nommés photons.
- Ces quanta permettent d'expliquer l'effet photoélectrique car c'est l'interaction d'un photon avec la matière qui entraîne l'extraction d'un électron. L'énergie du photon doit être suffisante, l'extraction est alors instantanée. De plus, l'énergie de l'électron extrait augmente quand la fréquence de la radiation augmente, ce qui est conforme à la description des ondes électromagnétiques par des quanta, car l'énergie d'un photon augmente quand la fréquence augmente.

Avec le modèle ondulatoire, on devrait observer un arrachage pour toute intensité lumineuse, il suffirait d'attendre assez longtemps pour que suffisamment d'énergie soit transférée quelle que soit la radiation utilisée, ce qui n'est pas le cas. De plus, avec le modèle ondulatoire, l'énergie cinétique des électrons extraits ne devrait pas dépendre de la fréquence de la radiation lumineuse, or elle en dépend.

**7** Réaliser un bilan d'énergie

- $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$
- $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$   
 $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = (5,03 \text{ eV} - 4,67 \text{ eV}) \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}\cdot\text{eV}^{-1}$   
 d'où  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 5,76 \times 10^{-20} \text{ J}$ .

**8** Calculer l'énergie d'un photon

- $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$
- $\mathcal{E}_{\text{photon}} = 6,93 \times 10^{-19} \text{ J} + \frac{1}{2} \times 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (7,60 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 9,56 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda \text{ (en m)} = \frac{h \text{ (en J}\cdot\text{s)} \times c \text{ (en m}\cdot\text{s}^{-1})}{\mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ (en J)}}$$

$$\text{D'où } \lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}{9,56 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

$\lambda = 2,08 \times 10^{-7} \text{ m} = 208 \text{ nm}$   
Cela correspond à une radiation UV.

**9** Calculer des rendements

- La puissance électrique disponible diminue lorsque l'éclairement  $E$  diminue.
- $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}} \text{ (en W)}}{\mathcal{P}_{\text{lum}} \text{ (en W)}}$   
avec  $\mathcal{P}_{\text{lum}} \text{ (en W)} = E \text{ (en W}\cdot\text{m}^{-2}) \times S \text{ (en m}^2)$ .
- La surface du panneau est  $S = 1,1 \text{ m}^2$ .

D'après le graphique, on a donc :

$\mathcal{P}_{\text{lum}}$ (W)	$\mathcal{P}_{\text{elec}}$ (W)
1 100	100
660	60
220	20

Dans tous ces cas,  $\eta_{\text{max}} = 0,09$  soit 9 %. Ce rendement ne dépend pas de l'éclairement.

**10** Exploiter un rendement

- L'augmentation du rendement des cellules permet une augmentation de la puissance électrique disponible.
- $\mathcal{P}_{\text{elec}} = \eta \times \mathcal{P}_{\text{lum}}$

$$\mathcal{P}_{\text{elec}} = \frac{22,3}{100} \times 1,13 \times 10^1 \text{ W} = 2,52 \text{ W}$$

**11** Citer des applications de l'interaction photon-matière

- Dans le capteur de lumière d'un appareil photographique numérique, des photons sont absorbés ; leur énergie permet d'arracher des électrons au semi-conducteur constituant le capteur.
- Dans une diode électroluminescente, le courant électrique provoque l'émission de photons.

**12** Reconnaître l'absorption ou l'émission de photons

- Cellule photoélectrique : absorption de photons.
- Chargeur photovoltaïque : absorption de photons.
- DEL infrarouge de télécommande : émission de photons.

**13** Connaître les critères de réussite

Conservation de l'énergie

- On relève graphiquement la fréquence seuil à partir de laquelle un électron est arraché :  $\nu_s \approx 8,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$   
On en déduit la longueur d'onde seuil :  $\lambda_s \text{ (en m)} = \frac{c \text{ (en m}\cdot\text{s}^{-1})}{\nu_s \text{ (en Hz)}}$   
Donc  $\lambda_s = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}{8,8 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 3,4 \times 10^{-7} \text{ m}$ .
- $\lambda_s$  est la longueur d'onde qui correspond à l'énergie minimale permettant d'arracher un électron à la surface du zinc. C'est donc

la longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il ne sera plus possible d'arracher un électron à ce métal.

2. On a :  $\mathcal{E}_{\text{photon}}$  (en J) =  $h$  (en J·s)  $\times$   $\nu$  (en Hz = s<sup>-1</sup>)

De plus,  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$  et  $W_{\text{extraction}} = h \times \nu_s$

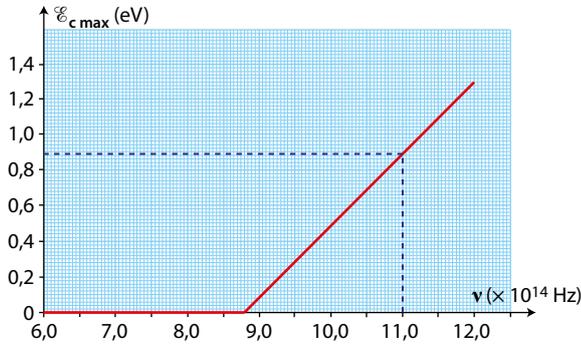
Donc  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - h \times \nu_s = h \times \nu - h \times \nu_s = h \times (\nu - \nu_s)$

$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times (1,1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} - 8,8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1})$

$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 1,5 \times 10^{-19} \text{ J}$

soit  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 0,91 \text{ eV}$ .

3. Graphiquement, on recherche l'énergie correspondant à une fréquence égale à  $1,1 \times 10^{15} \text{ Hz}$ .



On relève :  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 0,9 \text{ eV}$ .

Cette valeur est en accord avec la précédente.

**14** À chacun son rythme

**Une histoire de rendement**

1. Les différentes puissances mises en jeu s'écrivent :

$\mathcal{P}_{\text{elec}} = 305 \text{ W}$  ;

$\mathcal{P}_{\text{lum}}$  (en W) =  $E$  (en W·m<sup>-2</sup>)  $\times$   $S$  (en m<sup>2</sup>) où  $S$  est la surface totale de toutes les cellules :

$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times (160 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \times 60 = 1,54 \times 10^3 \text{ W}$ .

2.  $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$ .

3.  $\eta_{\text{max}} = \frac{305 \text{ W}}{1,54 \times 10^3 \text{ W}} = 0,200$  soit 20,0 %.

**15** Énergie cinétique des électrons

1.a. D'après la formule indiquée dans l'énoncé :

$\mathcal{E}_{c \text{ max}}$  (en J) =  $e$  (en C)  $\times$   $U_a$  (en V)

$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2,80 \text{ V} = 4,48 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

b. Par définition,  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \frac{1}{2} \times m_e \times v_{\text{max}}^2$ .

Il vient donc  $v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times \mathcal{E}_{c \text{ max}}}{m_e}}$

soit  $v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times 4,48 \times 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 9,92 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

2. Le bilan énergétique de l'effet photoélectrique s'écrit :

$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$

3. Il découle de ce bilan :  $W_{\text{extraction}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - \mathcal{E}_{c \text{ max}}$

L'énergie d'un photon est :

$\mathcal{E}_{\text{photon}}$  (en J) =  $\frac{h \text{ (en J} \cdot \text{s)} \times c \text{ (en m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\lambda \text{ (en m)}}$ .

L'énergie cinétique maximale est  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = e \times U_a$ .

On en tire :  $W_{\text{extraction}} = \frac{h \times c}{\lambda} - e \times U_a$ .

D'où :

$W_{\text{extraction}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{171 \times 10^{-9} \text{ m}}$

$- 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2,80 \text{ V}$

$W_{\text{extraction}} = 7,15 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

4. L'énergie d'un photon associée à une radiation de 350 nm est :

$\mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{350 \times 10^{-9} \text{ m}}$

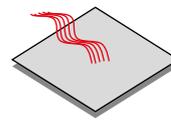
$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 5,68 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

Cette énergie est inférieure au travail d'extraction : l'effet photoélectrique ne peut donc pas se produire pour ce métal avec cette radiation.

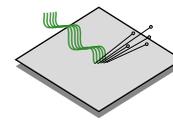
**16** Photoelectric effect

**Traduction :** En 1914, le physicien américain Robert MILLIKAN a découvert que la lumière ayant des fréquences inférieures à une certaine valeur de coupure, appelée fréquence seuil, n'éjectait pas de photoélectrons de la surface du métal, quelle que soit la luminosité de la source. Ces résultats étaient tout à fait inattendus. Étant donné qu'il est possible d'extraire des électrons avec de la lumière et que l'énergie d'un faisceau de lumière est liée à son intensité, la physique classique prédirait qu'un faisceau de lumière plus intense éjecterait des électrons de plus grande énergie qu'un faisceau moins intense, quelle que soit la fréquence.

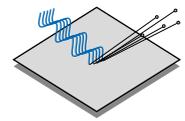
Mais ce n'était pas le cas.



La lumière rouge n'éjecte pas de photoélectrons (même si elle est très intense).



La lumière verte éjecte des photoélectrons (même si elle est très faible).



La lumière bleue éjecte des photoélectrons avec plus d'énergie que la lumière verte (même si elle est très faible).

En fait, peut-être que ces résultats ne sont pas si typiques et qu'ils changeraient avec différents métaux. La plupart des métaux ont des fréquences seuils qui sont dans le spectre ultraviolet et seulement quelques-unes sont assez basses pour atteindre le spectre visible et être vertes ou bleues comme dans l'exemple ci-dessus.

1. Que représente la fréquence seuil ?
2. Expliquer en quoi les résultats étaient surprenants à l'époque.
3. Les schémas seraient-ils identiques quel que soit le métal ?

**Réponses :**

1. La fréquence seuil est la fréquence minimale de la radiation qui permet d'observer l'effet photoélectrique.

2. L'effet de seuil n'est pas le même suivant la nature du métal. Soit l'extraction a lieu, soit elle est impossible, indépendamment de la durée d'exposition.

Or avec le modèle ondulatoire de la lumière, une plus grande durée d'exposition devrait apporter suffisamment d'énergie pour réaliser l'extraction. Le modèle ondulatoire ne permet donc pas d'expliquer l'effet photoélectrique.

3. La situation schématisée ici est celle d'un métal pour lequel l'effet photoélectrique se produit avec des radiations visibles de longueur d'onde inférieure ou égale à celle correspondant au vert (donc avec un seuil voisin de 550 nm) ; pour d'autres métaux, ce seuil est dans le violet ou dans l'ultraviolet. Les schémas ne seraient donc pas les mêmes.

**17** Comparaison de l'effet photoélectrique

1. Les longueurs d'onde des radiations visibles sont comprises entre 400 nm et 800 nm.

Les fréquences correspondantes sont données par :

$\nu \text{ (en Hz)} = \frac{c \text{ (en m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\lambda \text{ (en m)}}$ .

On en déduit les fréquences correspondantes :

$\lambda$ (en m)	$\nu$ (en Hz)
400	$7,50 \times 10^{14}$
800	$3,75 \times 10^{14}$

Par lecture graphique, on constate que le potassium est le seul des trois métaux cités pour lequel la fréquence seuil (environ  $5,5 \times 10^{14}$  Hz) se situe entre les fréquences extrêmes des radiations visibles. Les deux autres métaux ont des fréquences seuils plus grandes.

Le potassium est donc le seul de ces trois métaux pour lequel l'effet photoélectrique est possible en utilisant des radiations lumineuses visibles.

**2.a.** Le bilan d'énergie s'écrit :  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$

donc  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$

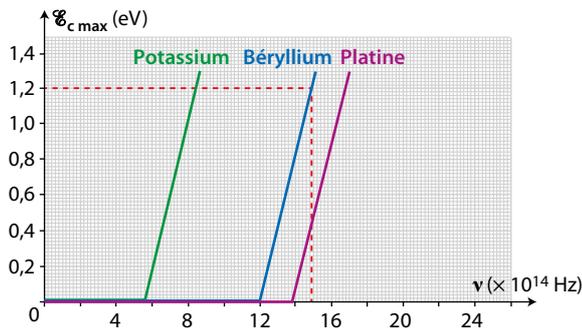
soit  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = h \times \nu - W_{\text{extraction}}$

**b.** L'équation précédente montre que  $\mathcal{E}_{c \text{ max}}$  est une fonction affine de la fréquence  $\nu$ .

Le coefficient directeur est égal à la constante de Planck  $h$ . C'est le même pour toutes les courbes.

L'ordonnée à l'origine est l'opposée du travail d'extraction, elle dépend du métal.

**c.** Pour déterminer le coefficient directeur on prend deux points sur l'une des courbes.



Par exemple, sur la courbe du béryllium on a :

$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 0$  eV pour  $\nu = 12,0 \times 10^{14}$  Hz

et  $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 1,2$  eV pour  $\nu = 14,9 \times 10^{14}$  Hz.

On en déduit :

$$h = \frac{1,2 \text{ eV} - 0 \text{ eV}}{14,9 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} - 12,0 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4,1 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

Il faut multiplier par  $1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1}$  pour convertir en  $\text{J} \cdot \text{s}$ .

Il vient alors  $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

**Remarque :** on retrouve un résultat cohérent avec la valeur admise :  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Pour déterminer le travail d'extraction on relève les fréquences seuils. Le travail d'extraction est égal à l'énergie d'un photon de fréquence égale à la fréquence seuil :  $W_{\text{extraction}} = h \times \nu_s$ .

Métal	$\nu_s$	$W_{\text{extraction}}$
Potassium	$5,5 \times 10^{14}$ Hz	$3,6 \times 10^{-19}$ J
Béryllium	$12,0 \times 10^{14}$ Hz	$7,96 \times 10^{-19}$ J
Platine	$13,8 \times 10^{14}$ Hz	$9,15 \times 10^{-19}$ J

## 18 Résolution de problème

### Une maison autonome ?

#### Introduction

On cherche à savoir si l'installation de 10 panneaux photovoltaïques permet de couvrir les besoins d'une habitation.

#### Solution détaillée :

Pour connaître l'énergie électrique produite, il faut évaluer le rendement des panneaux et connaître l'énergie lumineuse reçue.

#### Étape 1 : Évaluation du rendement des panneaux

L'énergie lumineuse par unité de surface cumulée sur une année à Bordeaux est donnée dans le doc. **A**. Elle est comprise entre  $1\,450 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$  et  $1\,600 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ . On peut prendre une moyenne de  $1\,525 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ .

La durée d'ensoleillement est 2 050 h sur l'année.

L'ensoleillement moyen est donc :

$$E = \frac{1\,525 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}}{2\,050 \text{ h}} = 0,743\,9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Pour déterminer le rendement, on choisit dans les données du doc. **B** la courbe moyenne la plus proche. C'est celle pour laquelle  $E = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque utilisé sont données dans le doc. **B**. La surface du panneau est égale à  $1,46 \text{ m}^2$ . Pour une puissance lumineuse surfacique égale à  $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , la puissance lumineuse reçue est donc :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 1,46 \text{ m}^2 = 1,17 \times 10^3 \text{ W}.$$

Il s'agit maintenant de déterminer la puissance électrique maximale à partir du schéma **B**. La puissance électrique est donnée par la relation  $\mathcal{P}_{\text{élec}} = U \times I$ . Donc la puissance augmente quand  $U$  augmente à  $I$  constant ou quand  $I$  augmente à  $U$  constant.

On remarque sur le graphique que la puissance augmente jusqu'à ce que la tension dépasse 35 V environ. En effet, pour des tensions inférieures à 35 V, l'intensité est constante mais ensuite pour des tensions supérieures à 35 V, l'intensité diminue fortement.

La puissance électrique maximale est obtenue pour une tension proche de 35 V. L'intensité correspondante est proche de 6 A.

On a alors  $\mathcal{P}_{\text{élec}} = 35 \text{ V} \times 6 \text{ A} = 2 \times 10^2 \text{ W}$ .

Le rendement du panneau est  $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$  ;

$$\text{donc } \eta = \frac{2 \times 10^2 \text{ W}}{1,17 \times 10^3 \text{ W}} = 0,17, \text{ soit environ } 17 \text{ \%}.$$

#### Étape 2 : Évaluation de la production

L'énergie lumineuse reçue par un panneau est égale à l'énergie lumineuse surfacique reçue multipliée par la surface du panneau :  $\mathcal{E}_{\text{lum}} = 1\,525 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \times 1,46 \text{ m}^2 = 2,23 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ .

Avec un rendement de 17 %, l'énergie électrique produite par un panneau est :

$$\mathcal{E}_{\text{élec-1 panneau}} = 2,23 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 0,17 = 3,8 \times 10^2 \text{ kW} \cdot \text{h}.$$

Avec 10 panneaux cette énergie produite sera 10 fois plus grande :  $\mathcal{E}_{\text{élec}} = 3,8 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ .

#### Étape 3 : Confrontation avec les besoins de l'habitation

Les caractéristiques du logement sont données dans le doc. **D**. Ce logement est de classe A. La consommation totale sur une année est égale à l'énergie surfacique évaluée dans le diagnostic énergétique multipliée par la surface du logement, soit ici :

$$\mathcal{E} = 25 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \times 120 \text{ m}^2 = 3,0 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}.$$

L'énergie électrique produite ( $3,8 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ) est donc supérieure aux besoins ( $3,0 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ).

#### Conclusion

L'installation de 10 panneaux fournira une énergie électrique supérieure aux besoins, elle semble donc suffisante. Cependant, dans ces calculs, on s'est basé sur une valeur approximative de l'énergie surfacique annuelle et on n'a pas tenu compte des pertes par effet Joule dans les systèmes électriques de fonctionnement des panneaux (régulation de la tension fournie...). Une marge de sécurité est de plus nécessaire, il est possible qu'elle soit atteinte avec les 10 panneaux car la production calculée est supérieure d'environ 25 % aux besoins prévus. Il faudra cependant d'autres dispositifs d'approvisionnement car la production comme la consommation ne sont pas constantes sur toute une année.

## 19 Python

### Programmons l'effet photoélectrique

Ressources pour le professeur à télécharger :  
Fichier Python

1. La ligne du programme qui traduit la conservation d'énergie lors de l'effet photoélectrique est la ligne :

```
Ec=Ephoton-efet_photo[metal]
```

**2.a.** Pour une longueur d'onde de radiation incidente  $\lambda = 530 \text{ nm}$ , l'effet photoélectrique est observé avec le potassium :

$$W_{\text{extraction}} = 2,3 \text{ eV} = 3,7 \times 10^{-19} \text{ J},$$

$$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 4,6 \times 10^{-2} \text{ eV} = 7,3 \times 10^{-21} \text{ J},$$

$$v_{\text{max}} = 1,3 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

**b.** On a maintenant :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1,30 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}} = 2,31 \times 10^{-7} \text{ m} = 231 \text{ nm}.$$

Le platine et l'or sont les éléments cités qui ne peuvent pas conduire à un effet photoélectrique dans ces conditions.

**Remarque :** pour le platine  $W_{\text{extraction}} = 5,8 \text{ eV}$ .

Et on a maintenant :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 1,30 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 8,62 \times 10^{-19} \text{ J} \text{ ou } 5,39 \text{ eV}.$$

Donc  $\mathcal{E}_{\text{photon}} < W_{\text{extraction}}$ , cela explique pourquoi l'extraction n'est pas possible avec le platine.

Pour l'or  $W_{\text{extraction}} = 5,4 \text{ eV}$  et  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = 5,39 \text{ eV}$ .

Donc  $\mathcal{E}_{\text{photon}} < W_{\text{extraction}}$ , l'extraction n'est pas possible avec l'or.

**3.** Pour le métal calcium et une longueur d'onde  $\lambda = 280 \text{ nm}$ , le programme affiche notamment :

$$W_{\text{extraction}} = 2,9 \text{ eV} = 4,6 \times 10^{-19} \text{ J},$$

$$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 1,5 \text{ eV} = 2,5 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

L'énergie d'un photon peut être calculée à partir de la longueur d'onde :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{h \times c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{280 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

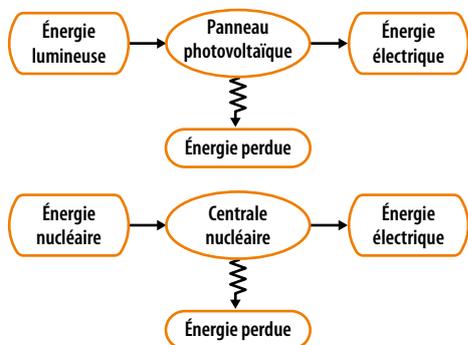
$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 7,10 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

Cela vérifie la conservation de l'énergie :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$$

## 20 Production électrique

1.

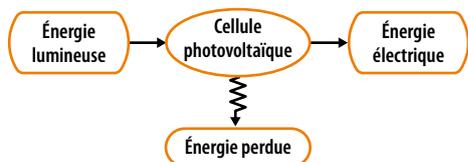


## Vers le Bac

### Préparation à l'écrit

#### 21 Installation de panneaux photovoltaïques

1.



**2.a.** On relève, pour un éclairement de  $1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , une puissance maximale de  $180 \text{ W}$ .

**b.** La tension de fonctionnement est alors proche de  $24 \text{ V}$ .

**c.** On a alors :  $I = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{U}$ , soit  $I = \frac{180 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 7,5 \text{ A}$ .

**2.a.** Prenons l'exemple de la courbe de  $150 \text{ W}$ . Les coordonnées de chaque point de cette courbe sont telles que leur produit vaut  $150 \text{ W}$ . Les autres courbes sont construites de la même manière.

**b.** Graphiquement, pour un éclairement de  $1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , on observe une puissance maximale comprise entre  $250 \text{ W}$  et  $260 \text{ W}$ . On prendra  $250 \text{ W}$ .

**c.** La puissance lumineuse est donnée par la relation  $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \times S$ .  
 $S = 1,675 \text{ m} \times 0,992 \text{ m} = 1,66 \text{ m}^2$   
 soit  $\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 1,66 \text{ m}^2$

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,66 \times 10^3 \text{ W}$$

Le rendement est donné par la relation  $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$

$$\eta = \frac{250 \text{ W}}{1,66 \times 10^3 \text{ W}} = 0,15 \text{ soit } 15 \%$$

**d.** L'énergie solaire moyenne reçue en France par an et par  $\text{m}^2$  dépend de la région. Cette énergie évolue entre moins de  $1\,220 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$  et plus de  $1\,760 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ .

Pour calculer la production électrique moyenne, il suffit d'utiliser le rendement du panneau.

En prenant les valeurs extrêmes connues, cette production électrique moyenne évolue entre :

$$1\,220 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1} \times 0,15 = 183 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$$

et

$$1\,760 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1} \times 0,15 = 264 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}.$$

On obtient donc une énergie électrique proche de :

$$2 \times 10^2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}.$$

**3.a.** L'énergie produite en 2019 par le nucléaire est  $380 \text{ TW} \cdot \text{h}$  soit  $380 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{h} = 380 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ .

La surface de panneaux nécessaire pour égaler l'énergie nucléaire est calculée en divisant l'énergie annuelle produite par le nucléaire par celle produite par un panneau de  $1 \text{ m}^2$  :

$$\frac{380 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}}{2 \times 10^2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}} = 1,9 \times 10^9 \text{ m}^2.$$

**b.** D'après le doc. **C**, la production solaire annuelle actuelle est  $12 \text{ TW} \cdot \text{h}$ . Cela correspond à :

$$\frac{12 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}}{2 \times 10^2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}} = 6 \times 10^7 \text{ m}^2.$$

Faisons le rapport entre ces deux surfaces.

$$\frac{1,9 \times 10^9}{6 \times 10^7} = 3 \times 10^1.$$

La surface des panneaux devrait être multipliée par 30 pour que que la production solaire atteigne la production nucléaire.

**3.** Le rendement est  $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$ .

La puissance lumineuse reçue par le panneau est proportionnelle à la puissance lumineuse surfacique et à la surface.

De plus,  $\text{surface} = \text{longueur} \times \text{largeur}$ . Donc :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \times S$$

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 1\,318 \times 10^{-3} \text{ m} \times 994 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,31 \times 10^3 \text{ W}$$

La puissance électrique maximale a été déterminée précédemment :  $\mathcal{P}_{\text{élec}} = 180 \text{ W}$

Donc le rendement maximal est :

$$\eta = \frac{180 \text{ W}}{1,31 \times 10^3 \text{ W}} = 0,137 \text{ ou } 13,7 \%$$

4.a. Lorsque l'éclairement est de  $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , la puissance électrique maximale d'un panneau est égale à  $180\text{ W}$ .

Dans ces conditions, pour produire  $3,5\text{ kWc}$  il faut :

$$\frac{3,5 \times 10^3}{180} = 19,4 \text{ panneaux, soit } 20 \text{ panneaux.}$$

b. L'énergie lumineuse par unité de surface reçue à Lyon cumulée sur une année est égale à  $1\,450\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Avec 20 panneaux, l'énergie lumineuse reçue sera :

$$\mathcal{E}_{\text{lum}} = 1\,450\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2} \times 1\,318 \times 10^{-3}\text{ m} \times 994 \times 10^{-3}\text{ m} \times 20$$

$$\mathcal{E}_{\text{lum}} = 3,80 \times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h.}$$

Le rendement étant  $10\%$ , l'énergie électrique produite sera  $\mathcal{E}_{\text{elec}} = 3,80 \times 10^3\text{ kW}\cdot\text{h.}$

Avec un prix de vente égal  $0,20\text{ €/kW}\cdot\text{h}$ , le revenu sera :

$$3,80 \times 10^3\text{ kW}\cdot\text{h} \times 0,20\text{ €/kW}\cdot\text{h} = 760\text{ €.}$$

## 22 Effet photoélectrique

1.  $\mathcal{E}_{\text{photon1}} = \frac{h \times c}{\lambda_1}$

$$\mathcal{E}_{\text{photon1}} = \frac{6,63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s} \times 3,00 \times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}{400 \times 10^{-9}\text{ m}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{photon1}} = 4,97 \times 10^{-19}\text{ J.}$$

2. Si on n'observe pas d'effet photoélectrique lorsque la longueur d'onde est  $\lambda_2 = 700\text{ nm}$ , c'est que l'énergie de chaque photon n'est alors pas suffisante pour extraire un électron, elle est donc inférieure au travail d'extraction.

3. Le modèle ondulatoire prévoit que l'énergie lumineuse augmente avec la durée d'éclairement. Avec ce modèle, une augmentation de la durée d'éclairement devrait permettre d'extraire des électrons. Ce n'est pas ce qui est observé. L'effet photoélectrique a donc remis en cause le modèle ondulatoire de la lumière.

4. L'énergie du photon permettant d'extraire un électron est en partie utilisée pour extraire un électron. L'excédent est communiqué à l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Pour un électron proche de la surface du métal, la loi de conservation de l'énergie impose :  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{\text{c,max}}$

L'énergie cinétique maximale de l'électron est alors :

$$\mathcal{E}_{\text{c,max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$$

$$\text{On a } W_{\text{extraction}} = 2,29\text{ eV} = 3,66 \times 10^{-19}\text{ J.}$$

$$\text{Donc } \mathcal{E}_{\text{c,max}} = 4,97 \times 10^{-19}\text{ J} - 3,66 \times 10^{-19}\text{ J} = 1,31 \times 10^{-19}\text{ J.}$$

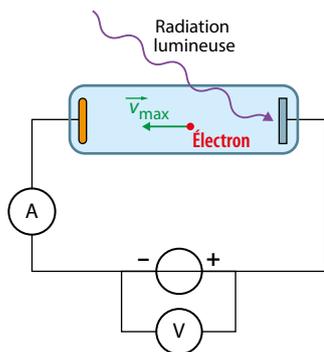
$$\text{De plus, } \mathcal{E}_{\text{c,max}} = \frac{1}{2} \times m_e \times v_{\text{max}}^2.$$

La valeur de la vitesse maximale d'un électron est donc :

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \mathcal{E}_{\text{c,max}}}{m_e}},$$

$$\text{soit } v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,31 \times 10^{-19}\text{ J}}{9,11 \times 10^{-31}\text{ kg}}} = 5,36 \times 10^5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

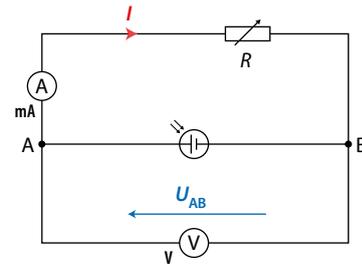
5.



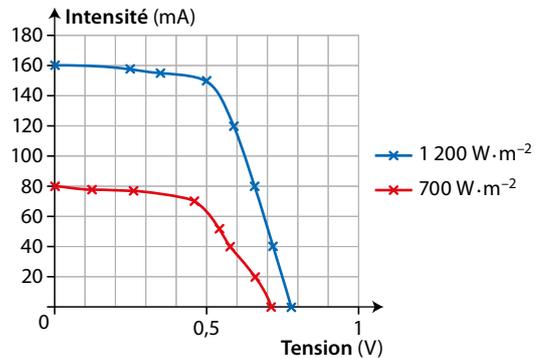
## 23 De la cellule au panneau photovoltaïque

### Partie I

1.



2.



3.a. Calcul à effectuer :  $\mathcal{P}_{\text{elec}}$  (en W) =  $U$  (en V)  $\times I$  (en A).

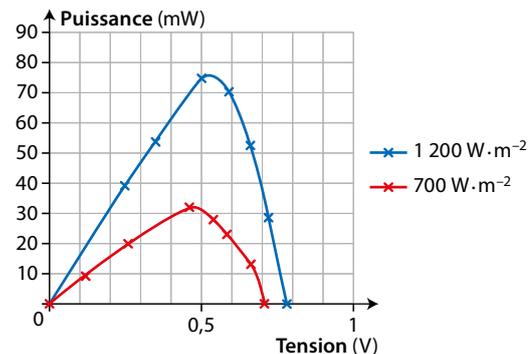
• Cas 1 : éclairement de  $700\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

$U_{\text{AB}}$ (V)	0,71	0,66	0,58	0,54	0,46	0,26	0,12	0
$I$ (mA)	0	20	40	52	70	77	78	80
$\mathcal{P}_{\text{elec}}$ (mW)	0	13,2	23,2	28,1	32,2	20,0	9,4	0

• Cas 2 : éclairement de  $1\,200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

$U_{\text{AB}}$ (V)	0,78	0,72	0,66	0,59	0,5	0,35	0,25	0
$I$ (mA)	0	40	80	120	150	155	158	160
$\mathcal{P}_{\text{elec}}$ (mW)	0	28,8	52,8	70,8	75,0	54,3	39,5	0

b.



4.a. Le rendement est  $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$ .

La puissance lumineuse est  $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \times S$  où  $E$  est l'éclairement exprimé en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  et  $S$  la surface du capteur exprimée en  $\text{m}^2$ . Ici  $S = 0,042\text{ m} \times 0,042\text{ m} = 1,76 \times 10^{-3}\text{ m}^2$ .

• Pour  $E = 700\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,23\text{ W, et d'après le graphique } \mathcal{P}_{\text{elec,max}} = 33\text{ mW,}$$

$$\text{donc } \eta = \frac{0,033\text{ W}}{1,23\text{ W}} = 0,027 \text{ soit } 2,7\%.$$

- Pour  $E = 1\,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  :  
 $\mathcal{P}_{\text{lum}} = 2,12 \text{ W}$ , et d'après le graphique  $\mathcal{P}_{\text{élec max}} = 76 \text{ mW}$ ,

donc  $\eta = \frac{0,076 \text{ W}}{2,12 \text{ W}} = 0,036$  soit 3,6 %.

**b.** La tension correspondant au rendement maximal est obtenue par lecture graphique :

- pour  $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  :  $U = 0,48 \text{ V}$  ;
- pour  $1\,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  :  $U = 0,53 \text{ V}$ .

**c.** On calcule l'intensité par  $I = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec max}}}{U}$  :

- pour  $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  :  $I = 68,8 \text{ mA}$  ;
- pour  $1\,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  :  $I = 143 \text{ mA}$ .

## Partie II

La puissance électrique (en watt) s'obtient en multipliant la tension (en volt) par l'intensité (en ampère).

- Dans une association série :  
 – La tension aux bornes de l'association est égale à la somme des tensions aux bornes de chaque dipôle. Donc  $U = 30 \times U_{\text{cellule max}}$ ,  
 soit :  $U = 30 \times 0,52 \text{ V} = 15,6 \text{ V}$ .

– L'intensité du courant qui traverse chaque dipôle est identique, soit ici :  $I = 112 \text{ mA}$ .

– La puissance est alors  $\mathcal{P} = 15,6 \text{ V} \times 0,112 \text{ A} = 1,75 \text{ W}$ .

• Dans une association dérivation :

– La tension est la même aux bornes de chaque cellule  $U = 0,52 \text{ V}$ .

– L'intensité du courant est la somme des intensités des courants délivrés par chaque module :  $I = 30 \times I_{\text{cellule max}}$ , soit  $I = 3,36 \text{ A}$ .

– La puissance est alors  $\mathcal{P} = 0,52 \text{ V} \times 3,36 \text{ A} = 1,75 \text{ W}$ .

**Conclusion :** À priori les puissances électriques, et donc les rendements sont les mêmes. Mais les pertes par effet Joule ne seront pas les mêmes et dépendent notamment des caractéristiques (courant, tension) de l'appareil disposé en aval (un régulateur en général). Elles seront plus grandes dans l'association en dérivation (plus grande intensité).

La sensibilité aux pannes ne sera pas la même non plus. Elle sera plus grande dans l'association en série car la coupure d'une cellule annule tout le courant.

Un couplage entre portions en série et portions en dérivation est de ce fait couramment utilisé.

