

Sciences physiques

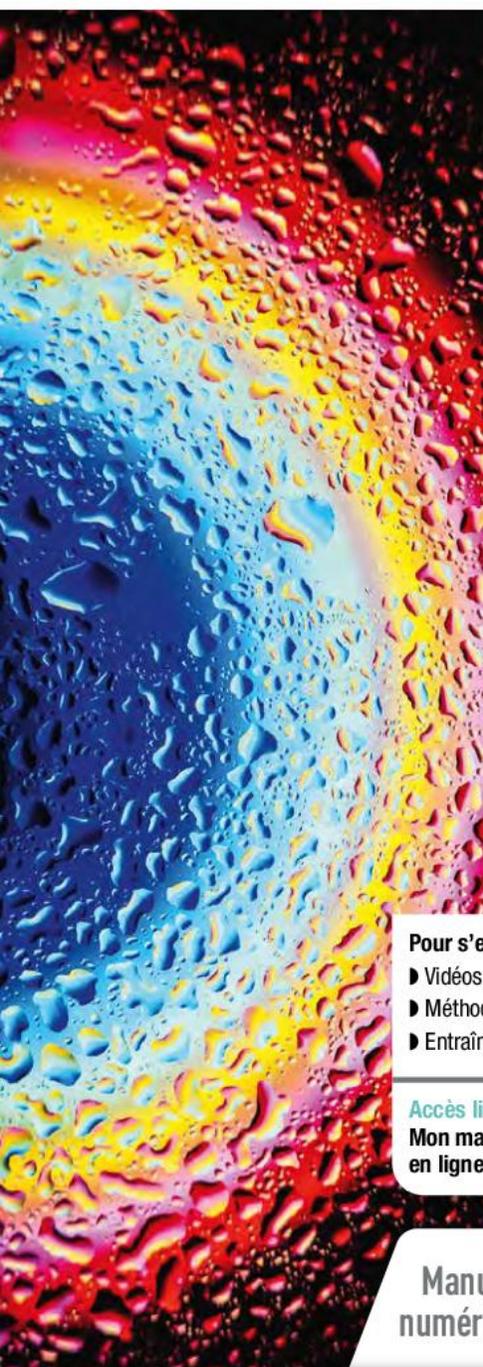


PRÉPARATION À
L'ÉPREUVE ÉCRITE

Spécialité SI

NOUVEAU BAC • PROGRAMME 2020

Collection Bellier • Lescure



Pour s'entraîner et réviser :

- ▶ Vidéos sur les points-clés
- ▶ Méthodes pour acquérir les bons réflexes
- ▶ Entraînement au Bac

Accès libre :

Mon manuel toujours accessible
en ligne sur mesmanuels.fr/4606265

Manuel
numérique



Ressources
numériques



hachette
ÉDUCATION

Remerciements

Nous remercions vivement Guy Bouyrie qui a accepté de participer à la relecture critique du manuscrit.
Nous remercions Thomas Corben, Clément Bertin et Damien Cambay, pour leurs conseils en anglais, en programmation python et Arduino et en mathématiques.
Nous remercions Xavier Yvart, Proviseur au Lycée des Graves de Gradignan de nous avoir accueillis pour la réalisation des photos d'expériences, et la Technicienne Sylvie Thiault pour son aide dans la mise au point des expériences.
Nous remercions Caroline Luc et Marie-Ghyslaine Gasnet pour leur participation au numérique.
Les auteurs tiennent à remercier leurs familles pour leur accompagnement pendant ces mois intenses d'écriture.

Les éditeurs tiennent à remercier les nombreux enseignants qui, par leurs avis exprimés lors de tables rondes ou de rencontres avec nos délégués pédagogiques dans les différentes académies, nous ont aidés à élaborer cet ouvrage.

www.hachette-education.com
© Hachette Livre 2020
58, rue Jean Bleuzen - 92178 Vanves Cedex
ISBN : 978-2-01-786624-4
ISBN à utiliser pour toute commande de l'ouvrage



L'usage de la photocopie des ouvrages scolaires est encadré par la loi www.cfcopies.com

Enseignants, dans quel cadre pouvez-vous réaliser des COPIES DE MANUELS SCOLAIRES pour vos élèves ?

Grâce aux différents accords signés entre le CFC, votre établissement et le ministère de l'Éducation nationale :

- vous pouvez réaliser des photocopies d'extraits de manuels (maximum 10 % du livre) ;
- vous pouvez diffuser des copies numériques d'extraits de manuels dans le cadre d'une projection en classe (au moyen d'un vidéoprojecteur, d'un TBI-TNI...) ou d'une mise en ligne sur l'intranet de votre établissement, tel que l'ent (maximum 4 pages consécutives dans la limite de 5 % du livre) ;
- n'oubliez pas d'indiquer les références bibliographiques des ouvrages utilisés !

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

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

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de droit de copie (20, rue des Grands-Augustins – 75006 Paris), constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par l'article L.335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

Sciences physiques

Spécialité SI



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

Fiche 1 Écriture d'un résultat numérique

A Notation scientifique d'un nombre

La notation scientifique d'un nombre décimal est l'écriture de ce nombre sous la forme $a \times 10^n$, le nombre a ne possédant qu'un chiffre non nul avant la virgule ($1 \leq a < 10$).

Exemples

$3,00 \times 10^8$ et $2,521 \times 10^{-1}$ sont des notations scientifiques.

$12,36 \times 10^8$ n'est pas une notation scientifique.

B Chiffres significatifs

Les chiffres significatifs d'un nombre sont les chiffres présents dans le nombre a de sa notation scientifique $a \times 10^n$.

Exemples

$22,6 \text{ m} = 2,26 \times 10^1 \text{ m}$ → 3 chiffres significatifs

$0,0023 \text{ s} = 2,3 \times 10^{-3} \text{ s}$ → 2 chiffres significatifs

$100 \text{ mL} = 1,00 \times 10^2 \text{ mL}$ → 3 chiffres significatifs

C Expression du résultat d'un calcul

En l'absence d'information sur les incertitudes, le résultat d'un calcul doit être écrit en prenant en compte la précision des données utilisées.

Cas d'une multiplication ou d'une division	Cas d'une addition ou d'une soustraction
<ul style="list-style-type: none"> Repérer le nombre de chiffres significatifs de chaque donnée. Effectuer le calcul. Le résultat ne doit pas avoir plus de chiffres significatifs que la donnée qui en comporte le moins. Il faut donc arrondir convenablement le résultat final. 	<ul style="list-style-type: none"> Écrire les données dans la même unité si ce n'est pas déjà fait. Repérer le nombre de décimales de chaque donnée. Effectuer le calcul. Le résultat ne doit pas avoir plus de décimales que la donnée qui en comporte le moins. Il faut donc arrondir convenablement le résultat final.

Exemple

2 chiffres significatifs $\frac{8,4 \times 10^{-1}}{5,4 \times 10^{-4}} = 1,5 \times 10^{-3}$
 3 chiffres significatifs
 donc le résultat s'écrit avec **deux** chiffres significatifs.

Exemple

$87,3 + 25,48 = 112,8$
 1 décimale 2 décimales
 donc le résultat s'écrit avec **une seule** décimale.

Lorsque l'on effectue un calcul en plusieurs étapes, **les résultats des étapes intermédiaires ne doivent pas être arrondis**. En revanche, le résultat final doit comporter un nombre correct de chiffres significatifs.

Fiche 2 Rédiger une réponse nécessitant l'utilisation d'une relation

Méthode

La rédaction d'une réponse utilisant une relation scientifique ne doit pas se limiter au résultat du calcul. Toutes les étapes de la résolution doivent apparaître.

- Écrire une phrase introduisant la **grandeur** recherchée.
- Écrire l'**expression littérale de la relation** à utiliser.
- Vérifier si les **unités** des données sont cohérentes entre elles. Les convertir si cela est nécessaire.
- Présenter le calcul puis son résultat avec la bonne unité et le bon nombre de chiffres significatifs.
- Écrire une phrase de conclusion.

Exemple

Une radiation de longueur d'onde 532 nm traverse une fente de largeur 0,50 mm. Déterminer l'angle caractéristique de diffraction θ .

- On calcule l'**angle caractéristique de diffraction** θ .
- Pour cela, on applique la **relation** : $\theta = \frac{\lambda}{a}$.
- L'unité de la longueur d'onde (**nm**) n'est pas cohérente avec celle de l'ouverture de la fente (**mm**). Des conversions sont nécessaires :
 $0,50 \text{ mm} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ m}$ et $532 \text{ nm} = 5,32 \times 10^{-7} \text{ m}$.
- $\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{5,32 \times 10^{-7} \text{ m}}{5,0 \times 10^{-4} \text{ m}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ rad}$
- L'angle caractéristique de diffraction est $1,1 \times 10^{-3} \text{ rad}$.

Fiche 3 Mesures et incertitudes

A Erreurs de mesures

Une mesure n'est jamais parfaite même si elle est réalisée avec soin. Il existe toujours des **erreurs de mesures**.

Exemple : Lorsque l'on prélève un volume de liquide dans une fiole jaugée de 50,0 mL, le volume du liquide n'est pas exactement égal à 50,0 mL. Les sources d'erreurs sont multiples :

Erreur liée à une grandeur d'influence
La température de la solution n'est peut-être pas de 20 °C. Le volume effectif prélevé dépend de la température.

Erreur liée à l'opérateur
Le bas du ménisque du liquide n'est peut-être pas exactement au niveau du trait de jauge.

Erreur liée à la qualité du matériel
La tolérance indiquée par le fabricant permet d'évaluer l'écart entre le volume indiqué sur la fiole et le volume prélevé compte tenu des imperfections inévitables du matériel.

B Dispersion d'une série de mesures indépendantes

Dans le cas où on effectue n fois, dans les mêmes conditions, la mesure d'une grandeur G , on observe une dispersion des mesures.

On attribue comme valeur à G , la moyenne \bar{g} des résultats de ces n mesures.

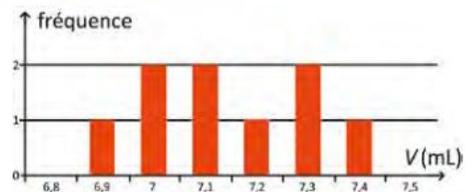
Il est possible de visualiser la dispersion des valeurs autour de la moyenne à l'aide d'un histogramme. Cette dispersion est caractérisée par l'**écart type** σ_{n-1} . Plus il est faible, plus les valeurs sont resserrées autour de la moyenne.

L'écart-type peut être calculé à l'aide d'un tableur ou d'une calculatrice.

Exemple : Des élèves ont déterminé le volume V d'une petite pièce en acier en la plongeant dans une éprouvette graduée remplie d'eau. Leurs résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

7,2 mL	7,3 mL	7,0 mL	6,9 mL	7,1 mL	7,1 mL	7,4 mL	7,0 mL	7,3 mL
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

La dispersion des résultats est visible sur un histogramme comme ci-contre.



Une calculatrice permet d'obtenir la moyenne et l'écart-type σ_{n-1} de cette série de neuf mesures indépendantes.

affichage calculatrice Casio	affichage calculatrice TI	affichage calculatrice Numworks
<pre> 1-Variable x̄ = 7.14444444 Σx = 64.3 Σx² = 459.61 xσn = 0.15713484 xσn-1 = 0.16666666 n = 9 </pre>	<pre> 1-Var Stats x̄ = 7.144444444 Σx = 64.3 Σx² = 459.61 Sx = .1666666667 σx = .1571348403 ↓n = 9 </pre>	
<p>En arrondissant à 4 chiffres significatifs : la moyenne est $\bar{V} = 7,144$ mL, l'écart-type est $\sigma_{n-1} = 0,1667$ mL.</p>		

G Incertitude-type

• Définition

L'**incertitude-type** associée à une grandeur mesurée G est notée $u(G)$ (u pour *uncertainty*). Elle fournit une estimation de l'**étendue des valeurs** que l'on peut raisonnablement attribuer à la grandeur. Elle a la même unité que la grandeur G . Il existe deux méthodes pour évaluer une incertitude-type.

• Évaluation de type A d'une incertitude-type

L'incertitude-type $u(G)$ est évaluée par la **méthode de type A** lorsqu'on effectue n fois la mesure d'une grandeur G dans les **mêmes conditions**.

L'incertitude-type est alors estimée par la relation : $u(G) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$.

Exemple : Pour les $n = 9$ mesures du volume de la pièce en acier du tableau précédent, l'incertitude-type est estimée par $u(V) = \frac{0,1667 \text{ mL}}{\sqrt{9}} = 0,05557 \text{ mL}$.

En arrondissant par excès et en ne gardant qu'un seul chiffre significatif, on écrit : $u(V) = 0,06 \text{ mL}$.

• Évaluation de type B d'une incertitude-type

L'incertitude-type $u(G)$ est évaluée par la **méthode de type B** lorsqu'on effectue une **mesure unique** d'une grandeur G . Elle peut être estimée à partir d'une formule fournie ou à l'aide d'un logiciel.

Exemple 1

Lors de la fabrication d'un conducteur ohmique, il y a plusieurs sources d'erreurs. Sur le dipôle, le fabricant indique une tolérance t à l'aide d'un code couleur. Par exemple, pour une résistance de 470Ω , lorsque la quatrième bague est dorée, la tolérance est $t = 24 \Omega$.

L'incertitude-type liée à la **tolérance** t d'un dispositif peut être prise égale à $\frac{t}{\sqrt{3}}$.

Il vient : $u(R) = \frac{24 \Omega}{\sqrt{3}} = 14 \Omega$.

En arrondissant par excès et en ne gardant qu'un seul chiffre significatif, on écrit : $u(R) = 2 \times 10^1 \Omega$.



Exemple 2

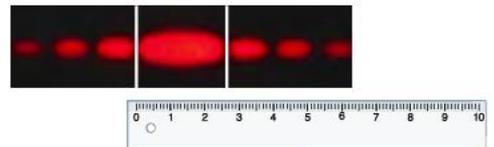
Lors de la mesure unique de la largeur ℓ de la tache centrale d'une figure de diffraction avec une règle graduée en millimètre, il y a plusieurs sources d'erreurs : certaines sont liées au matériel, d'autres à l'utilisateur.

L'erreur dite de double lecture est l'erreur due non seulement au positionnement du zéro de la règle mais aussi à celle de la lecture de la graduation.

L'incertitude-type liée à la **double lecture** sur une échelle graduée peut être prise égale à $\frac{1 \text{ graduation}}{\sqrt{6}}$.

Il vient : $u(\ell) = \frac{1 \text{ mm}}{\sqrt{6}} = 0,408 \text{ mm}$.

En arrondissant par excès et en ne gardant qu'un seul chiffre significatif, on écrit : $u(\ell) = 0,5 \text{ mm}$.



Exemple 3

Lors de la mesure unique d'un éclairement lumineux, il y a plusieurs sources d'erreurs : certaines sont liées au matériel, d'autres à l'utilisateur. Dans la notice de l'appareil utilisé, le fabricant indique une précision de p . Par exemple, $p = \pm 5 \%$.

L'incertitude-type liée à la précision de l'appareil peut être prise égale à $\frac{p \times \text{mesure}}{100 \times \sqrt{3}}$.

Il vient, pour un éclairement lumineux mesuré $E = 760 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $u(E) = \frac{5 \times 760 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{100 \times \sqrt{3}} = 21,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

En arrondissant par excès et en ne gardant qu'un seul chiffre significatif, on écrit : $u(E) = 3 \times 10^1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

D Incertitude-type composée

L'incertitude-type $u(G)$ est évaluée par la **méthode des incertitudes composées** lorsque la grandeur G s'exprime en fonction d'autres grandeurs A , B , etc. pour lesquelles les incertitudes-types associées $u(A)$, $u(B)$, etc. sont connues.

En terminale, les formules de composition à utiliser seront données.

Exemple

Un volume $V = 50,00$ mL d'un liquide, mesuré avec une fiole jaugée, a une masse $m = 53,28$ g mesurée avec une balance électronique.

La masse volumique calculée à partir de ces mesures est $\rho = \frac{m}{V} = \frac{53,28 \text{ g}}{50,00 \text{ mL}} = 1,066 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$.

L'incertitude-type associée à cette masse volumique déterminée par calcul est liée aux incertitudes-types associées aux grandeurs mesurées V et m intervenant dans ce calcul :

- l'incertitude-type sur m liée à l'utilisation de la balance électronique est $u(m) = 0,008$ g ;
- l'incertitude-type sur V liée à l'utilisation de la fiole jaugée est $u(V) = 0,07$ mL.

Lorsqu'une grandeur G s'obtient en multipliant ou divisant deux grandeurs A et B on a :

$$\left(\frac{u(G)}{G}\right)^2 = \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(B)}{B}\right)^2$$

D'après cette formule, on obtient ici : $\left(\frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2 = \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2$.

L'incertitude-type sur la masse volumique de la solution étudiée est : $u(\rho) = \rho \times \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2}$.

Donc $u(\rho) = \frac{53,28 \text{ g}}{50,00 \text{ mL}} \times \sqrt{\left(\frac{0,008 \text{ g}}{53,28 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0,07 \text{ mL}}{50,00 \text{ mL}}\right)^2} = 0,0015 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$.

En arrondissant par excès et en ne gardant qu'un seul chiffre significatif, on écrit : $u(\rho) = 0,002 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$.

E Écriture du résultat - Valeur de référence

• Écriture d'un résultat

Le résultat de la mesure d'une grandeur G est un **intervalle centré sur g** (moyenne de mesures répétées ou valeur mesurée lors d'une mesure unique) et de demi-largeur $u(G)$.

L'**unité** de $u(G)$ doit être la **même** que celle de g lorsqu'elle existe. Le **dernier chiffre significatif** conservé pour g est **celui** sur lequel porte l'incertitude $u(G)$.

Le résultat de la mesure de la grandeur G s'écrit $G = g \pm u(G)$ ou encore $g - u(G) \leq G \leq g + u(G)$.

Exemples	Mesures répétées du volume V de la pièce	Mesure unique de masse volumique ρ à partir d'un calcul
Estimation de la grandeur	moyenne : $\bar{V} = 7,144$ mL	calcul : $\rho = 1,066 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$
Incertitude-type évaluée	$u(V) = 0,06$ mL	$u(\rho) = 0,002 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$
Écriture du résultat	$V = (7,14 \pm 0,06)$ mL	$\rho = (1,066 \pm 0,002) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$
Ceci signifie qu'il est raisonnable de penser que	le volume est tel que $7,08 \text{ mL} \leq V \leq 7,20 \text{ mL}$ avec une évaluation de type A de l'incertitude-type.	la masse volumique est telle que $1,064 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1} \leq \rho \leq 1,068 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ avec une évaluation de type B des incertitudes-types.

• Comparaison d'une mesure à une valeur de référence

Dans certains cas, la grandeur mesurée a une valeur déjà connue précisément, considérée comme une **valeur de référence** g_{ref} . Un résultat de mesure g associé à une incertitude-type $u(g)$ peut être comparé

à la valeur de référence en calculant le quotient $\frac{|g - g_{\text{ref}}|}{u(g)}$. Le résultat de mesure est en accord avec la valeur de référence si ce quotient est inférieur ou égal à un.

JE RÉVISE EN VIDÉO

Vidéos de cours

- Tracé d'un vecteur accélération
- Mouvement dans un champ uniforme
- Lois de Kepler
- Du premier principe au bilan d'énergie
- Loi de Newton
- Le décalage Doppler
- Conditions d'interférences
- Bilan énergétique de l'effet photoélectrique



JE M'AUTO-ÉVALUE

QCM



Je retrouve toutes les ressources sur lycee.hachette-education.com/physique-si/tle

Sommaire

Pratiquer une démarche scientifique.....	5
L'approche par compétences.....	6



Mouvement et interactions

1 Mouvement et deuxième loi de Newton.....	7
1 Accélération d'un système	
2 Vecteur accélération lors d'un mouvement circulaire	
Vers le BAC	23
2 Mouvement dans un champ uniforme.....	25
1 Mouvement dans un champ de pesanteur	
2 Évolution des énergies d'un système en mouvement dans un champ de pesanteur	
3 Accélérer des électrons dans un microscope électronique	
Vers le BAC	43
3 Mouvement dans un champ de gravitation.....	45
1 Les satellites artificiels de la Terre	
2 Les lois de Kepler à l'ère de l'informatique	
Vers le BAC	57



L'énergie : conversions et transferts

4 Premier principe de la thermodynamique et bilan énergétique.....	59
1 Premier principe de la thermodynamique	
2 Variation d'énergie interne d'un système incompressible	
Vers le BAC	73
5 Transferts thermiques.....	75
1 Résistance thermique de conduction d'un matériau	
2 Température d'un système incompressible au cours du temps	
3 Température terrestre moyenne	
Vers le BAC	89



Ondes et signaux

6 Sons et effet Doppler.....	91
1 Atténuation des sons	
2 Effet Doppler et vitesse d'un véhicule	
Vers le BAC	107
7 Diffraction et interférences.....	109
1 Le phénomène de diffraction	
2 La diffraction d'une lumière monochromatique	
3 Les interférences lumineuses	
Vers le BAC	125
8 La lumière : un flux de photons.....	127
1 L'effet photoélectrique	
2 Rendement d'une cellule photovoltaïque	
Vers le BAC	143

Côté maths

Côté maths 1 Écrire une dérivée – Dériver une fonction.....	17
Côté maths 2 Déterminer la primitive d'une fonction.....	37
Côté maths 3 Résoudre une équation différentielle de second membre constant et non nul.....	83
Côté maths 4 Utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque.....	101

Exercices Synthèse	145
---------------------------------	-----

Corrigés des exercices	147
-------------------------------------	-----

Index	159
--------------------	-----

L'écrit

1h
(durée indicative)



MARS

✓ Sujet national(*)

Des notions liées aux différentes parties du programme.

Des tâches simples et complexes mobilisant les compétences de la démarche scientifique.

Un contexte à s'approprier, des documents à exploiter.

Extraits du BO spécial n° 2 du 13 février 2020

L'épreuve de spécialité sciences de l'ingénieur de cette même classe est constituée de deux parties écrites :

- la première d'une durée indicative de trois heures concerne les sciences de l'ingénieur ;
- la seconde d'une durée indicative d'une heure concerne les sciences physiques.

Chaque partie est notée sur 20 points. Les candidats composent sur deux copies séparées, les deux notes attribuées à chaque partie sont communiquées aux candidats. La note finale sur 20 points de l'épreuve de spécialité sciences de l'ingénieur est obtenue en multipliant par 0,75 la note sur 20 points de la partie science de l'ingénieur et par 0,25 la note sur 20 points de la partie sciences physiques et en additionnant ces deux résultats.

Une unique thématique peut servir de support commun aux deux parties de l'épreuve ; si des thématiques différentes sont utilisées, elles sont choisies afin d'être complémentaires du point de vue des champs scientifiques abordés.

Partie Sciences physiques

L'épreuve porte sur les notions et contenus, capacités exigibles et compétences figurant dans le programme de l'enseignement de sciences physiques complétant, en classe de terminale, l'enseignement de spécialité de sciences de l'ingénieur.

L'épreuve comporte deux exercices indépendants et s'appuie de manière équilibrée sur différents thèmes du programme. Le sujet accorde une place significative à la modélisation et à la résolution de questions avec prise d'initiative. Les sujets peuvent contenir des documents et inclure des questions relatives aux aspects expérimentaux de la discipline et aux capacités numériques identifiées dans le programme.

Exercice Type SI

27
CORRECTION

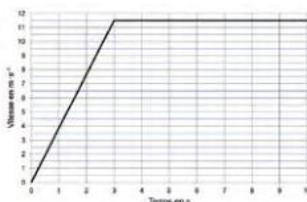
Retransmission par caméra mobile

Mobiliser et organiser ses connaissances ; faire preuve d'esprit critique.

Pour filmer un 100 m en athlétisme, on utilise le système X-track qui est une caméra motorisée sur rails parallèlement à la piste. Le record actuel de cette épreuve est 9,58 s. La figure ci-dessous présente la consigne de vitesse du X-track.



Graphique A



1. Caractériser la nature du mouvement du X-track :

- pendant la phase 1 ($0 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$) ;
- pendant la phase 2 ($3 \text{ s} \leq t \leq 10 \text{ s}$).

(*) Chaque année, le professeur indique la liste des notions n'étant pas évaluées au BAC.

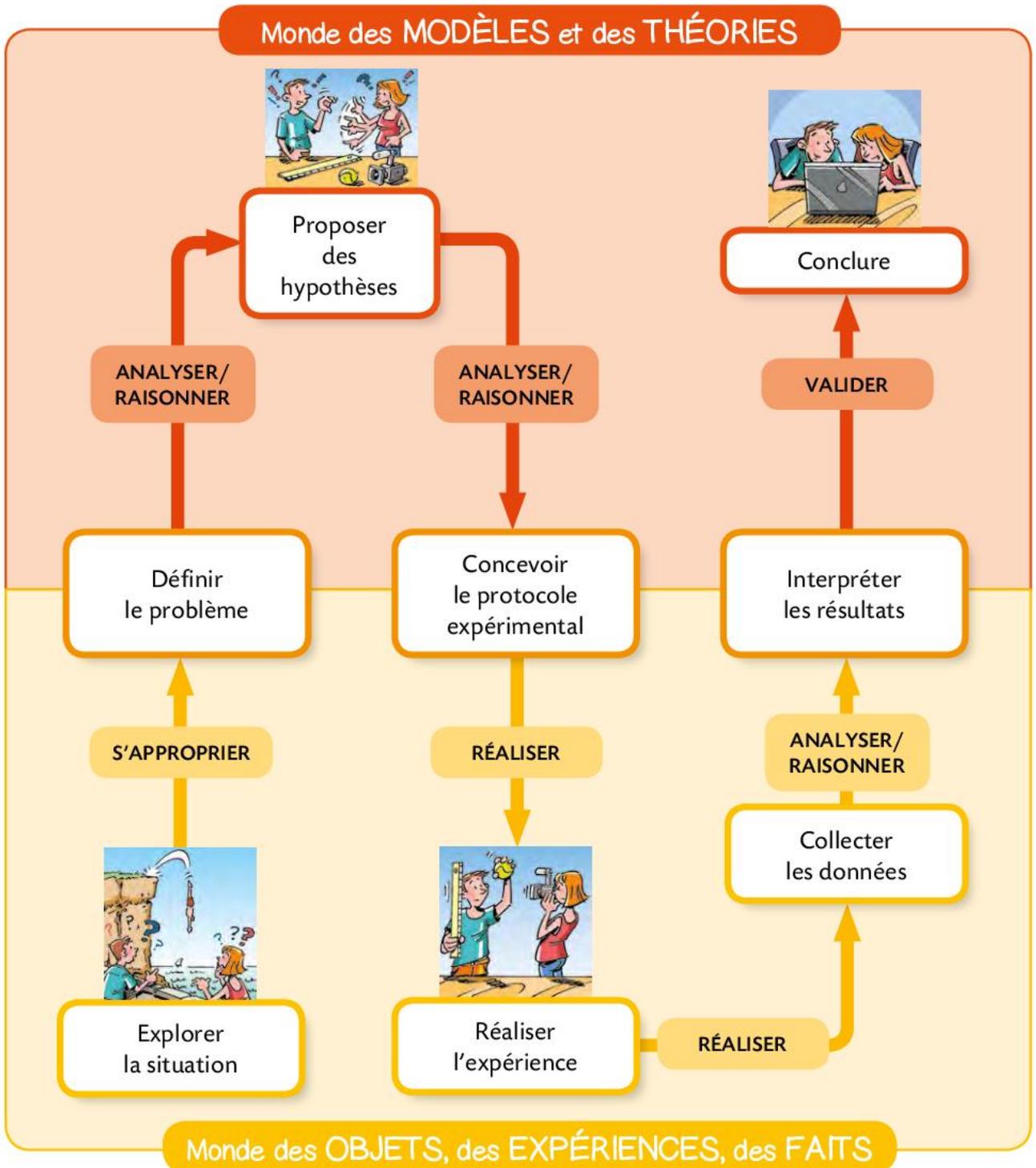
Notions exclues du programme de la partie Sciences physiques de l'épreuve pour la session 2021

- Effet Doppler ; décalage Doppler
- Décrire la lumière par un flux de photons

Pratiquer une démarche scientifique, c'est proposer des théories, des modèles permettant d'interpréter ou d'analyser des événements, des phénomènes.

Le scientifique doit distinguer le « monde des objets, des expériences, des faits » et le « monde des modèles et des théories ».

Les **compétences** de la démarche scientifique permettent de rendre compte de ces passages successifs entre ces deux mondes. Ces compétences sont détaillées dans le tableau de la page 6. Le schéma très simplifié ci-dessous résume ces allers-retours entre les deux mondes. Il ne fige en rien le déroulement de la démarche qui peut être plus complexe.



L'approche par compétences

Dans la continuité du Collège, la notion de compétence est associée, au Lycée, à la démarche scientifique (connaître, s'approprier, analyser-raisonner, réaliser, valider, communiquer).

Dans votre manuel, ces compétences sont indiquées dans toutes les activités et au début de chaque exercice.

Les compétences de la démarche scientifique sont déclinées dans le tableau ci-dessous :

Connaître (CON)	Restituer ses connaissances.
S'approprier (APP)	Observer, décrire des phénomènes. Extraire et organiser l'information. Mobiliser et organiser ses connaissances. Énoncer une problématique.
Analyser/Raisonner (ANA-RAIS)	Procéder à des analogies. Formuler des hypothèses. Choisir, élaborer, justifier un protocole. Exploiter des observations, résultats, mesures, informations, graphiques, tableaux, schémas. Proposer un modèle. Évaluer un ordre de grandeur. Passer d'une forme de langage scientifique à une autre. Prendre conscience des limites d'un modèle. Construire les étapes d'une résolution de problème.
Réaliser (RÉA)	Mettre en œuvre un protocole en respectant les règles de sécurité. Utiliser le matériel de manière adaptée. Utiliser un langage de programmation. Utiliser un modèle pour prévoir, décrire et expliquer. Faire un schéma adapté. Construire des vecteurs. Construire un tableau, tracer un graphique. Effectuer des calculs. Écrire un résultat de manière adaptée (unités, chiffres significatifs, incertitudes, etc.). Effectuer une analyse dimensionnelle.
Valider (VAL)	Interpréter des observations, des mesures, des résultats, etc. Confronter des résultats à des hypothèses. Confronter un modèle à des résultats expérimentaux. Discuter un modèle, un résultat, une hypothèse, etc. Identifier les sources d'erreurs. Estimer une incertitude de mesure. Comparer à une valeur de référence. Faire preuve d'esprit critique et argumenter. Proposer d'éventuelles améliorations de la démarche ou du modèle. Mettre en lien des phénomènes et des concepts.
Communiquer (COM)	Pratiquer une langue vivante étrangère. Utiliser un vocabulaire scientifique adapté et rigoureux. Présenter sous une forme appropriée (schéma, graphique, tableau, figure). Rendre compte à l'écrit en utilisant un vocabulaire adapté. Rédiger ou présenter oralement un protocole, une explication ou une argumentation. Présenter un travail soigné. Échanger entre pairs.

1

Mouvement et deuxième loi de Newton



Lors de compétitions sportives ou de shows, des motards sont amenés à réaliser des acrobaties ou des sauts au cours desquels ils peuvent atteindre des vitesses de valeur élevée.

- Comment calculer la valeur de la vitesse atteinte par le motard ?

➤ Rendez-vous : Exercice 17 p. 20

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Définir le vecteur vitesse et le vecteur accélération. Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées du vecteur position et/ou du vecteur vitesse. **Activité 1 p. 9**
- Citer et exploiter les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire. **Activité 2 p. 10**
- Caractériser le vecteur accélération pour quelques mouvements. **Activité 1 p. 9**
- 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. **Activité 1 p. 9**
- Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système, cette position étant donnée. **Exercice 11 p. 19**
- Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié. **Exercice 21 p. 21**
- Utiliser la deuxième loi de Newton pour en déduire le vecteur accélération du centre de masse, les forces appliquées au système étant connues, ou la somme des forces appliquées au système, le mouvement du centre de masse étant connu. **Exercice 1 p. 16**
- **Capacité mathématique** : dériver une fonction. **Exercice 22 p. 22**
- **Capacité numérique** : représenter, à l'aide d'un langage de programmation, des vecteurs accélération d'un point lors d'un mouvement. **Exercice 24 p. 22**

Le mouvement d'un système

- **Direction** : tangente à la trajectoire du système
- **Sens** : celui du mouvement du système
- **Valeur** : valeur moyenne de la vitesse du système entre deux instants très rapprochés t_i et t_{i+1}

$$v_i \text{ en m}\cdot\text{s}^{-1} \rightarrow v_i = \frac{M_i M_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} \leftarrow \begin{matrix} M_i M_{i+1} \text{ en m} \\ t_i \text{ et } t_{i+1} \text{ en s} \end{matrix}$$

\vec{v}_i

Vecteur vitesse

MOUVEMENT D'UN SYSTÈME

Vecteur variation de vitesse

$(\Delta\vec{v})_{i \rightarrow i+1}$

Défini entre deux positions M_i et M_{i+1} du système par $(\Delta\vec{v})_{i \rightarrow i+1} = \vec{v}_{i+1} - \vec{v}_i$

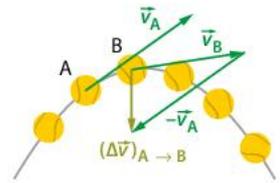
Vecteur somme des forces

$$\Sigma\vec{F} = m \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$

Dans un référentiel donné

- La somme des forces appliquées à un système et son vecteur variation de vitesse sont colinéaires et de même sens.
- Plus la masse du système est élevée, plus la valeur de la somme des forces doit être élevée pour faire varier le vecteur vitesse.
- Si $\Sigma\vec{F} = \vec{0}$, alors $\Delta\vec{v} = \vec{0}$: c'est le **principe d'inertie**.

Construction graphique



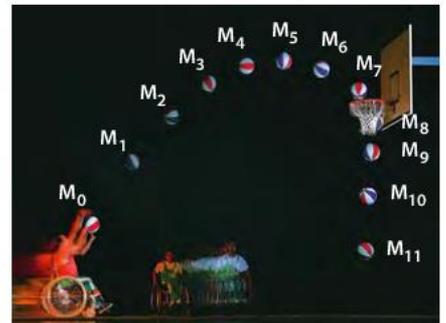
Réactiver ses connaissances

VIDÉO Tracé d'un vecteur variation de vitesse – QR Code p. 14

La chronophotographie du mouvement d'un ballon de basket dans un référentiel lié au sol est représentée ci-contre.

La valeur v_1 de la vitesse du ballon en M_1 est $5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La valeur v_2 de la vitesse en M_2 est $4,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

1. Construire les vecteurs vitesse \vec{v}_1 et \vec{v}_2 en utilisant l'échelle proposée : $1,0 \text{ cm} \leftrightarrow 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
2. Construire en M_2 le vecteur variation de vitesse $(\Delta\vec{v})_{1 \rightarrow 2}$.
3. En déduire la direction et le sens du vecteur somme des forces $\Sigma\vec{F}$ appliquées au ballon.



Flash test

3 min

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s).

	A	B	C
1. Le vecteur vitesse en un point est :	de sens opposé au mouvement.	tangent à la trajectoire.	de même sens que le mouvement.
2. Parmi les trois vecteurs variation de vitesse dessinés en vert ci-contre, lequel représente le vecteur $(\Delta\vec{v})_{1 \rightarrow 2}$?			
3. Le vecteur variation de vitesse est :	colinéaire et de même sens que la somme des forces appliquées au système.	de direction perpendiculaire à celle de la somme des forces appliquées au système.	colinéaire et de sens opposé à la somme des forces appliquées au système.

Activité 1 expérimentale

Accélération d'un système

Notion

Coordonnées des vecteurs position, vitesse et accélération en fonction du temps

Afin de mesurer les émissions polluantes des véhicules, on les soumet à différents « cycles » : accélérations, décélérations et paliers à vitesse de valeur constante. Un des tests, appelé cycle urbain, consiste à faire passer une voiture de 0 à 50 km · h⁻¹ en 26 secondes.

► **Objectif de l'activité :** Comment définir les vecteurs vitesse et accélération ?

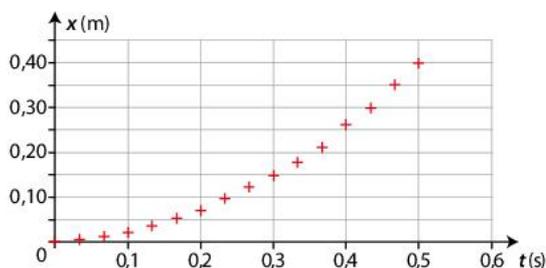


A Modélisation d'un test d'accélération d'une voiture

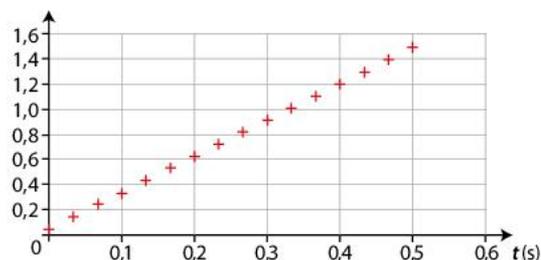
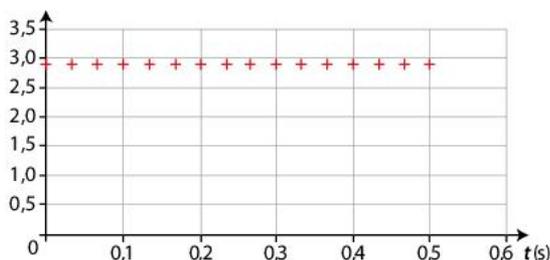
On modélise un test d'accélération d'une voiture sur piste avec une maquette de voiture qui peut se déplacer sans frottement sur un rail horizontal. Initialement immobile, elle est accélérée par une force \vec{F} horizontale constante. On s'intéresse au mouvement d'un point M de la maquette de la voiture.



B Exemple d'évolution de l'abscisse d'un point M d'une maquette de voiture en fonction du temps



C Exemple d'évolution des valeurs de la vitesse et de l'accélération du point M en fonction du temps



COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

Pour un mouvement rectiligne, suivant un axe Ox :

- La position d'un point M à la date t est donnée par le vecteur position $\vec{OM}(t)$ plus simplement noté \vec{OM} .
- \vec{OM} a pour abscisse x.
- x s'exprime en m.

- Le vecteur vitesse $\vec{v}(t)$ de M à la date t, plus simplement noté \vec{v} , est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt}$$

- \vec{v} a pour abscisse : $v_x = \frac{dx}{dt}$ en m · s⁻¹.

- Le vecteur accélération $\vec{a}(t)$ de M à la date t, plus simplement noté \vec{a} , est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

- \vec{a} a pour abscisse : $a_x = \frac{dv_x}{dt}$ en m · s⁻².

Pratique expérimentale

Elaborer et mettre en œuvre un protocole ANA-RAIS · RÉA

- Proposer et mettre en œuvre un protocole expérimental permettant de tracer l'évolution de l'abscisse x d'un point M d'une maquette de voiture, accélérée par une force constante, en fonction du temps.

Exploiter des informations ANA-RAIS

- Utiliser les outils de modélisation d'un logiciel tableur grapheur pour déterminer l'équation $x = f(t)$. L'allure de la courbe obtenue est-elle similaire à celle de la courbe B ?

Effectuer des calculs RÉA

- En déduire les équations $v_x = g(t)$ et $a_x = h(t)$. Associer à chaque équation la courbe C qui lui correspond.

Effectuer des calculs RÉA

- Quelle est la valeur de l'accélération, supposée constante, d'une voiture lors d'un test correspondant au cycle urbain ?

Un pas vers le cours

Utiliser un vocabulaire scientifique et rigoureux COM

- Comment définir les vecteurs vitesse et accélération ?

Vecteur accélération lors d'un mouvement circulaire

Notions

Vecteurs vitesse et accélération lors d'un mouvement circulaire
Repère de Frenet

Le lancer du marteau est une discipline d'origine celte consistant à lancer le plus loin possible un boulet en acier de 16 livres anglaises (7,257 kg). Pour cela, le sportif le fait tourner, puis le lâche.

► **Objectif de l'activité :** Comment exploiter les coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire ?

A Méthode de tracé d'un vecteur accélération

L'accélération en une position M_{i+1} , à la date t_{i+1} , peut être assimilée à l'accélération moyenne entre deux dates très proches t_i et t_{i+1} :

$$\vec{a}_{i+1} = \frac{(\Delta\vec{v})_{i \rightarrow i+1}}{\Delta t}$$

avec $\Delta t = t_{i+1} - t_i$.

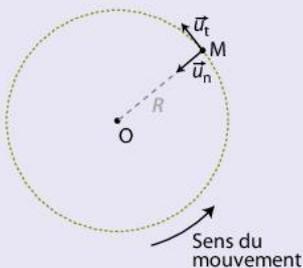
Pour construire le vecteur accélération \vec{a}_{i+1} :

- Construire en M_{i+1} le vecteur $(\Delta\vec{v})_{i \rightarrow i+1} = \vec{v}_{i+1} - \vec{v}_i$ en précisant l'échelle de vitesse choisie.
- Mesurer la longueur du segment fléché représentant $(\Delta\vec{v})_{i \rightarrow i+1}$, puis déterminer sa valeur $(\Delta v)_{i \rightarrow i+1}$.
- Calculer $a_{i+1} = \frac{(\Delta v)_{i \rightarrow i+1}}{\Delta t}$.
- Construire en M_{i+1} le vecteur \vec{a}_{i+1} sachant qu'il est colinéaire à $(\Delta\vec{v})_{i \rightarrow i+1}$ et de même sens. Préciser l'échelle d'accélération choisie.

COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

Le repère de Frenet noté $(M ; \vec{u}_n, \vec{u}_t)$ est défini par :

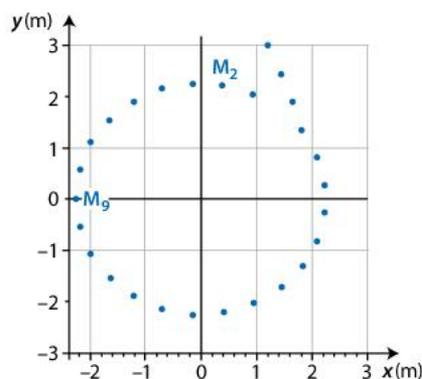
- une origine mobile liée au point matériel M étudié ;
- un vecteur unitaire \vec{u}_n perpendiculaire en M à la trajectoire et orienté vers l'intérieur de la trajectoire ;
- un vecteur unitaire \vec{u}_t tangent en M à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.



Dans le repère de Frenet, le vecteur accélération a pour expression :

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

B Positions d'un boulet en phase d'élan



Durée entre deux positions consécutives : $\Delta t = 25$ ms.

Analyse des documents

Exploiter des informations ANA

- 1 Décrire le mouvement du boulet en phase d'élan dans un référentiel terrestre.

Faire un schéma adapté RÉA

- 2 Construire, sur le document fourni, les vecteurs accélération du boulet en M_2 et M_9 .

Exploiter des résultats et des mesures ANA

- 3 En déduire les coordonnées a_n et a_t du vecteur accélération dans le repère de Frenet en M_2 et M_9 .

Exploiter des résultats et des mesures ANA

- 4 Montrer que ces coordonnées sont en accord avec le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE.

Un pas vers le cours

Rédiger une explication COM

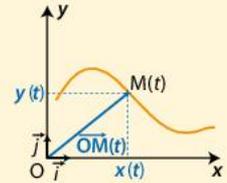
- 5 Comment exploiter les coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire ?

1 Les vecteurs position, vitesse et accélération

On se limite ici à l'étude du mouvement plan d'un point M d'un système dans un référentiel donné.

a. Vecteur position

- Dans un repère $(O ; \vec{i}, \vec{j})$ lié au référentiel d'étude, la position d'un point M est donnée par le **vecteur position** $\overrightarrow{OM}(t) : \overrightarrow{OM}(t) \begin{cases} x(t) \\ y(t) \end{cases}$.
- $x(t)$ et $y(t)$ ou plus simplement x et y sont les coordonnées cartésiennes du point M à l'instant t .



Vu en 1^{re}

En classe de Première, nous avons assimilé le vecteur vitesse \vec{v}_i d'un point M , en une position M_i de la trajectoire, au vecteur vitesse moyenne obtenu pour une durée Δt extrêmement courte :

$$\vec{v}_i = \frac{\overrightarrow{M_i M_{i+1}}}{t_{i+1} - t_i} = \frac{\overrightarrow{M_i M_{i+1}}}{\Delta t}$$

Remarque :

On obtient la valeur du vecteur position à partir de la relation $OM = \sqrt{x^2 + y^2}$.

b. Vecteur vitesse

- Le vecteur vitesse moyenne $\vec{v}_i = \frac{\overrightarrow{M_i M_{i+1}}}{t_{i+1} - t_i}$ s'écrit aussi $\vec{v}_i = \frac{(\Delta \overrightarrow{OM})_{i \rightarrow i+1}}{\Delta t}$

car $\overrightarrow{M_i M_{i+1}} = \overrightarrow{OM_{i+1}} - \overrightarrow{OM_i} = (\Delta \overrightarrow{OM})_{i \rightarrow i+1}$.

- Le vecteur vitesse d'un point en une position M_i est la limite de $\vec{v}_i = \frac{(\Delta \overrightarrow{OM})_{i \rightarrow i+1}}{\Delta t}$ lorsque Δt tend vers zéro.

Cette limite est la dérivée par rapport au temps du vecteur position à l'instant t_i : $\vec{v}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\Delta \overrightarrow{OM})_{i \rightarrow i+1}}{\Delta t} = \left(\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} \right)_{t_i}$ (Côté Maths 1 p. 17).

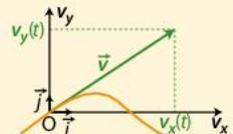
- Dans un référentiel donné, le **vecteur vitesse** d'un point M à l'instant t est égal à la dérivée, par rapport au temps, du vecteur position \overrightarrow{OM} à cet instant :

$$\vec{v}(t) = \left(\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} \right)_t \quad \text{noté plus simplement} \quad \vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$$

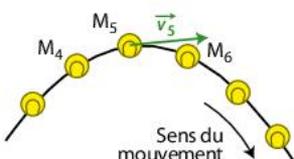
Valeur en $m \cdot s^{-1}$
Valeur en m
 t en s

- Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse $v_x(t)$ et $v_y(t)$ sont obtenues en dérivant, par rapport au temps, celles $x(t)$ et $y(t)$ du vecteur position $\overrightarrow{OM}(t)$:

$$\vec{v}(t) \begin{cases} v_x(t) = \left(\frac{dx}{dt} \right)_t \\ v_y(t) = \left(\frac{dy}{dt} \right)_t \end{cases} \quad \text{ou plus simplement} \quad \vec{v} \begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} \\ v_y = \frac{dy}{dt} \end{cases}$$



A Vecteur vitesse de M dans la position M_5



> Le vecteur \vec{v}_5 est tangent à la trajectoire en M_5 .

Remarques :

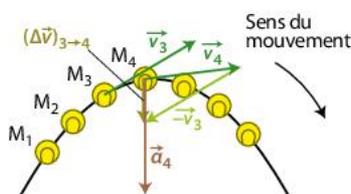
- v_x est aussi le coefficient directeur de la tangente à la courbe $x = f(t)$ tracée à cette date t . Il en est de même pour v_y et la tangente à la courbe $y = g(t)$.
- On obtient la valeur v du vecteur vitesse à partir de la relation : $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.
- Le vecteur vitesse est toujours tangent à la trajectoire et dirigé dans le sens du mouvement (construction A).



Tracé d'un vecteur accélération

VIDÉO DE COURS

B Vecteur variation de vitesse et vecteur accélération



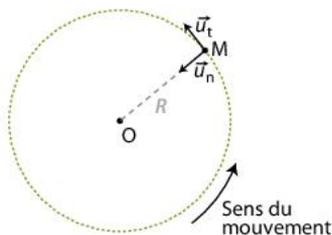
> Le vecteur variation de vitesse $(\Delta\vec{v})_{3\rightarrow 4}$ et le vecteur accélération \vec{a}_4 ont même direction et même sens.

Point maths ➔ Côté maths 1 p. 17

Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération peuvent être obtenues à partir de la dérivée seconde des coordonnées $x(t)$ et $y(t)$ du vecteur position :

$$\vec{a}(t) \begin{cases} a_x(t) = \left(\frac{dv_x}{dt}\right)_t = \left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)_t \\ a_y(t) = \left(\frac{dv_y}{dt}\right)_t = \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_t \end{cases}$$

C Repère de Frenet



> Le repère de Frenet noté $(M; \vec{u}_n, \vec{u}_t)$ 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.

c. Vecteur accélération

• Le vecteur accélération caractérise la variation du vecteur vitesse en fonction du temps.

• Par analogie avec le vecteur vitesse, on peut déterminer le vecteur accélération à un instant t_{i+1} : $\vec{a}_{i+1} = \frac{(\Delta\vec{v})_{i\rightarrow i+1}}{\Delta t}$ (construction **B**).

• Lorsque Δt tend vers zéro, le vecteur accélération à l'instant t_{i+1} s'écrit :

$$\vec{a}_{i+1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\Delta\vec{v})_{i\rightarrow i+1}}{\Delta t} = \left(\frac{d\vec{v}}{dt}\right)_{t_{i+1}}$$

• Dans un référentiel donné, le **vecteur accélération** d'un point M est égal à la dérivée, par rapport au temps, du vecteur vitesse \vec{v} à cet instant :

Valeur en $m \cdot s^{-2}$ ↙ ↘ Valeur en $m \cdot s^{-1}$

$$\vec{a}(t) = \left(\frac{d\vec{v}}{dt}\right)_t \text{ noté plus simplement } \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

t en s

• Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération $a_x(t)$ et $a_y(t)$ sont obtenues en dérivant, par rapport au temps, celles $v_x(t)$ et $v_y(t)$ du vecteur vitesse $\vec{v}(t)$:

$$\vec{a}(t) \begin{cases} a_x(t) = \left(\frac{dv_x}{dt}\right)_t \\ a_y(t) = \left(\frac{dv_y}{dt}\right)_t \end{cases} \text{ ou plus simplement } \vec{a} \begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} \end{cases}$$

Remarques :

- a_x est le coefficient directeur de la tangente à la courbe $v_x = f(t)$ tracée à la date t considérée. Il en est de même pour a_y et la tangente à la courbe $v_y = g(t)$.
- La valeur du vecteur accélération est donnée par : $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$.
- Le vecteur accélération \vec{a} est colinéaire et de même sens que le vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}$ (construction **B**).

2 Des exemples de mouvements

a. Mouvements rectilignes

Un système est animé d'un mouvement rectiligne si sa trajectoire est une portion de droite.

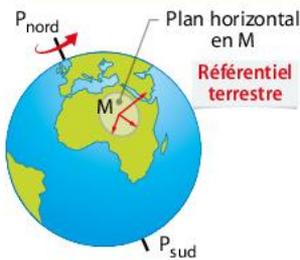
Mouvement	Rectiligne uniforme	Rectiligne uniformément varié
Vecteur accélération \vec{a}	$\vec{a} = \vec{0}$	Direction : droite support de la trajectoire Sens : – celui de \vec{v} si le mouvement est accéléré ; – opposé à \vec{v} si le mouvement est ralenti. Valeur : a ($m \cdot s^{-2}$) constante

b. Mouvements circulaires

• Un système est animé d'un mouvement circulaire si sa trajectoire est une portion de cercle.

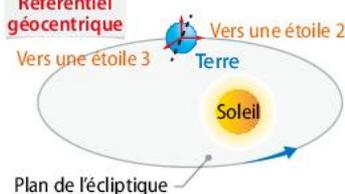
• Un repère privilégié pour l'étude d'un mouvement circulaire est le repère de Frenet noté $(M; \vec{u}_n, \vec{u}_t)$ (schéma **C**).

D Trois référentiels courants



➤ Origine en un point de la surface de la Terre, axes liés à la surface de la Terre. Peut être considéré comme galiléen, par exemple pour l'étude du mouvement d'un avion.

Vers une étoile 1
Référentiel géocentrique

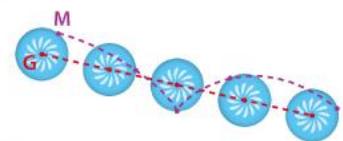


➤ Origine au centre de la Terre, axes pointant vers trois étoiles lointaines. Peut être considéré comme galiléen, par exemple pour l'étude du mouvement d'un satellite terrestre.

Terre
Soleil
Vers une étoile 1
Vers une étoile 2
Vers une étoile 3
Référentiel héliocentrique
Plan de l'écliptique

➤ Origine au centre du Soleil, axes pointant vers trois étoiles lointaines. Peut être considéré comme galiléen, par exemple pour l'étude du mouvement des planètes du système solaire.

E Centre de masse d'un système



➤ Au cours du mouvement d'un frisbee, le centre de masse G a un mouvement plus simple que celui d'un point M à la périphérie.

Dans le repère de Frenet, pour un mouvement circulaire de rayon R :

- le vecteur vitesse \vec{v} est tangent à la trajectoire, donc $\vec{v} = v\vec{u}_t$;
- le vecteur accélération \vec{a} a pour expression, $\vec{a} = \frac{v^2}{R}\vec{u}_n + \frac{dv}{dt}\vec{u}_t$ avec :
 - $a_n = \frac{v^2}{R}$, accélération normale du système ;
 - $a_t = \frac{dv}{dt}$, accélération tangentielle du système.

Mouvement	Circulaire uniforme	Circulaire varié
Vecteur vitesse \vec{v}	Direction : tangente à la trajectoire. Sens : celui du mouvement.	
	Valeur : v ($m \cdot s^{-1}$) constante	Valeur : v ($m \cdot s^{-1}$) variable
Vecteur accélération \vec{a}	Direction : variable et perpendiculaire à la trajectoire ($a_t = 0$) Sens : vers le centre de la trajectoire	Direction : variable et non perpendiculaire à la trajectoire ($a_t \neq 0$) Sens : vers l'intérieur de la trajectoire
	Valeur : a ($m \cdot s^{-2}$) = $\frac{v^2 (m \cdot s^{-1})^2}{R (m)}$ constante	Valeur : a ($m \cdot s^{-2}$) $\neq \frac{v^2 (m \cdot s^{-1})^2}{R (m)}$ variable

- Dans le cas où l'accélération tangentielle est nulle, alors $\frac{dv}{dt} = 0$, $v = \text{constante}$, le mouvement est circulaire uniforme.

3 La deuxième loi de Newton

a. Référentiel galiléen

Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel le principe d'inertie est vérifié (documents D).

b. Centre de masse d'un système

Le centre de masse G d'un système est l'unique point de ce système où peut toujours s'appliquer le principe d'inertie.

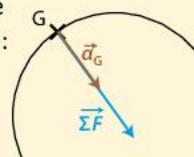
Lorsque l'on ramène l'étude du mouvement d'un système à celui de son centre de masse G , on considère que toute la masse du système est concentrée en G . L'étude du mouvement est alors plus simple (schéma E).

c. Énoncé de la deuxième loi de Newton

- Nous avons vu en Première la relation approchée : $\Sigma \vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$.
Si Δt tend vers zéro, $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \right) = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}$ et la relation devient $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$.

Dans un référentiel galiléen, la somme des forces $\Sigma \vec{F}$ appliquées à un système de masse m constante est égale au produit de sa masse par l'accélération \vec{a}_G de son centre de masse :

$$m \text{ en kg} \rightarrow \Sigma \vec{F} = m\vec{a}_G \rightarrow \text{Valeur en } m \cdot s^{-2}$$



- Dans le cas particulier d'un système immobile, $\Sigma \vec{F} = \vec{0}$.
Il vient alors, de la deuxième loi de Newton, $m\vec{a}_G = \vec{0}$, donc $\vec{a}_G = \vec{0}$ et par suite $\vec{v}_G = \text{cte}$. Le principe d'inertie (ou première loi de Newton) apparaît comme un cas particulier de la deuxième loi de Newton.

La deuxième loi de Newton permet de déterminer le vecteur accélération \vec{a}_G du centre de masse, les forces appliquées au système $\Sigma \vec{F}$ étant connues, ou inversement.

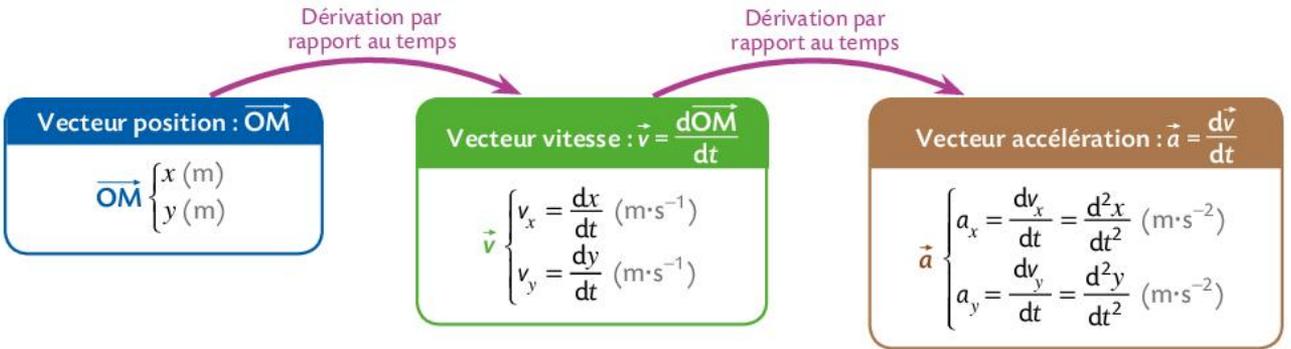
L'essentiel



▶ **VIDÉO DE COURS**
 Tracé d'un vecteur accélération
▶ **QCM**
 Version interactive

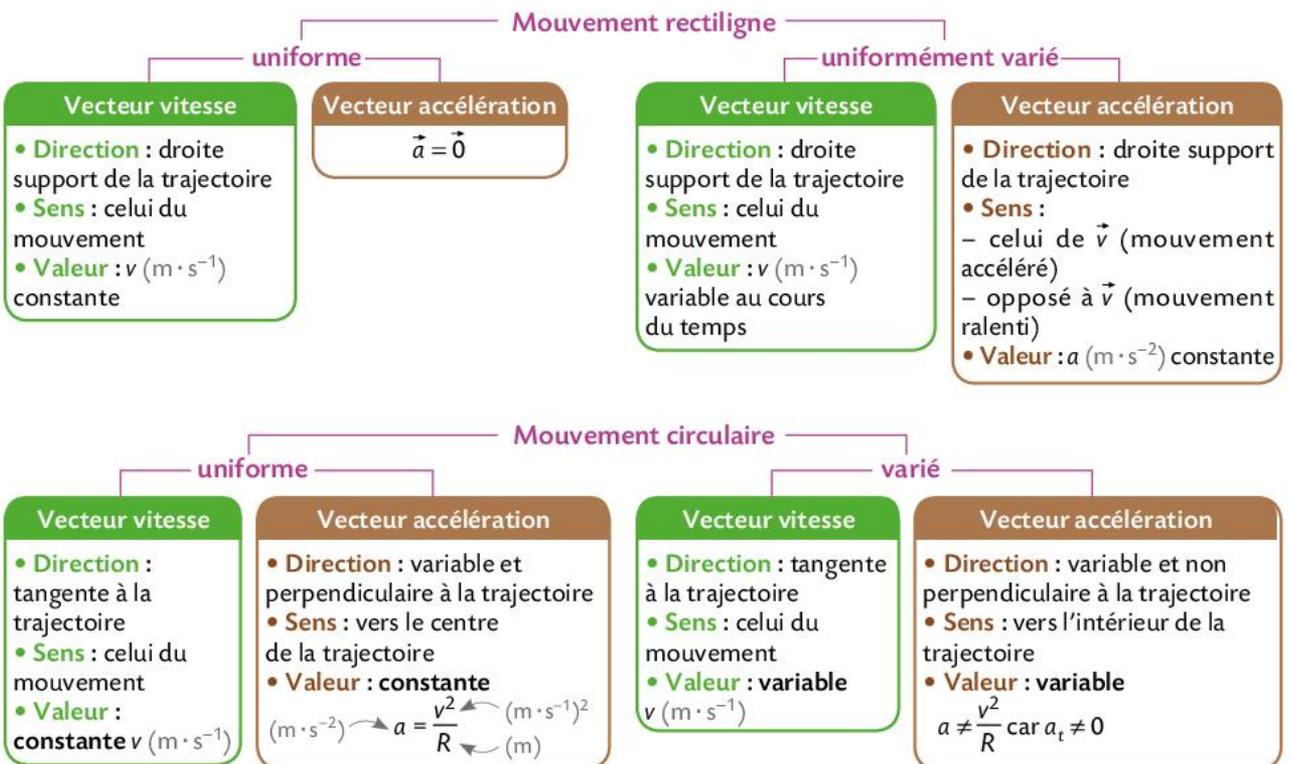
1 Les vecteurs position, vitesse et accélération

Dans un référentiel donné, associé à un repère cartésien $(O; \vec{i}, \vec{j})$, pour un point M d'un système, à toute date t :



2 Des exemples de mouvements

Dans un référentiel donné, les vecteurs \vec{v} et \vec{a} permettent de caractériser le mouvement d'un système :



3 La deuxième loi de Newton

Cette loi n'est valable que dans les **référentiels galiléens**, référentiels dans lesquels s'applique le principe d'inertie.

Deuxième loi de Newton

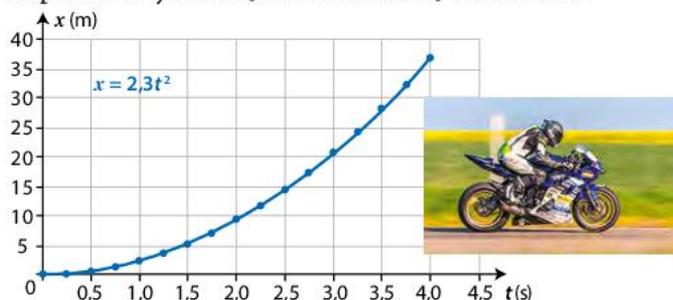
$$\Sigma \vec{F} = m \vec{a}_G$$

G est le centre de masse du système, seul point de ce système où s'applique toujours le principe d'inertie :
 $\Sigma \vec{F} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{v}_G = \text{cte.}$

QCM

A

Un motard effectue un essai sur une piste rectiligne. M est un point du système {moto et motard} d'abscisse x .



B

On a représenté les positions à intervalles de temps réguliers d'un point P pris sur le plateau horizontal d'un manège en mouvement de rotation autour d'un axe vertical.



Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s), puis vérifier la correction p. 147.

A	B	C
----------	----------	----------

1 Les vecteurs position, vitesse et accélération

Si erreur, revoir § 1 p. 11

1. Dans la situation A , la distance parcourue par la moto 3 s après le départ est :	$d = 20,7 \text{ m}$	$d = 6,9 \text{ m}$	$d = 10,4 \text{ m}$
2. Dans la situation A , la vitesse de la moto est donnée par la relation :	$v(t) = 2,3t$	$v(t) = 4,6t$	$v(t) = 4,6t + 2,3$
3. Dans la situation B , le vecteur vitesse \vec{v} du point P :	est un vecteur constant.	a une valeur constante.	varie au cours du temps.
4. D'après la situation B , le vecteur accélération \vec{a} du point P :	est dirigé vers le centre de la trajectoire.	a une valeur égale à $\frac{dv}{dt}$.	a une valeur égale à $\frac{v^2}{R}$, avec R le rayon du cercle.

2 Des exemples de mouvements

Si erreur, revoir § 2 p. 12

5. Dans la situation A , le mouvement du point M du système est :	rectiligne uniforme.	rectiligne uniformément accéléré.	curviligne accéléré.
6. Dans la situation B , le mouvement du point P du système est circulaire :	uniforme.	uniformément accéléré.	uniformément retardé.

3 La deuxième loi de Newton

Si erreur, revoir § 3 p. 13

7. Le centre de masse G d'un système :	est un point quelconque choisi d'un système.	est le seul point de ce système où peut toujours s'appliquer le principe d'inertie.	a en général un mouvement plus simple que les autres points du système.
8. La deuxième loi de Newton est donnée par la relation :	$\Sigma \vec{F} = m \frac{d\vec{v}_G}{dt}$	$\Sigma \vec{F} = m \vec{a}_G$	$\Sigma F = m \times a_G$
9. Dans la situation B , la somme des forces appliquées au point P est :	colinéaire et de même sens que le vecteur accélération.	perpendiculaire et de même sens que le vecteur accélération.	dirigée vers le centre de la trajectoire.

QCM version interactive

Les bons réflexes

Si l'énoncé demande de...

Il est nécessaire de...

Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération.

Réflexe 1

Ex. 4 p. 18

- Partir des coordonnées $x = f(t)$ et $y = g(t)$ du vecteur position, puis les dériver par rapport au temps pour obtenir celles du vecteur vitesse.
- Partir des coordonnées $v_x = h(t)$ et $v_y = i(t)$ du vecteur vitesse, puis les dériver par rapport au temps pour obtenir celles du vecteur accélération.

Exploiter les expressions des coordonnées de la vitesse et de l'accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire.

Réflexe 2

Ex. 6 p. 18

- Donner l'expression des coordonnées du vecteur accélération dans le repère de Frenet.
- Exploiter l'expression de l'accélération tangentielle $a_t = \frac{dv}{dt}$ pour déterminer l'uniformité ou non du mouvement circulaire étudié.
- Exploiter l'expression de l'accélération normale $a_n = \frac{v^2}{R}$ pour déterminer a_n , v ou R .

Déterminer l'accélération ou la somme des forces appliquées au système.

Réflexe 3

Ex. 12 p. 19

- Choisir un référentiel galiléen adapté au contexte du mouvement étudié.
- Énoncer la deuxième loi de Newton.
- Identifier les grandeurs connues et extraire la grandeur recherchée.

1 Exercice résolu

La fronde

Mobiliser ses connaissances ; effectuer des calculs.

Une fronde de longueur $L = 50$ cm retient un petit caillou de masse $m = 40$ g. Ce caillou, en rotation, a une vitesse de valeur constante $v = 7,0$ m·s⁻¹ autour de la main, dans un plan horizontal. On néglige l'action de l'air.

On considère qu'à cette vitesse, le poids est négligeable devant la force exercée par la corde.

- Déterminer les caractéristiques du vecteur accélération du caillou dans le repère de Frenet.
- Calculer la valeur de la force exercée par la corde sur le caillou.

2. Le caillou quitte la fronde. À chaque date t (en seconde), les coordonnées de son vecteur position dans

un repère orthonormé $(O ; \vec{i}, \vec{j})$ lié au référentiel d'étude sont :

$$\begin{cases} x = 7,0t \text{ (m)} \\ y = -4,9t^2 + 2,0 \text{ (m)} \end{cases}$$

- Dans quel référentiel le mouvement du système est-il étudié ?
- Déterminer les coordonnées v_x et v_y du vecteur vitesse du caillou à chaque instant.
- Déterminer les coordonnées a_x et a_y du vecteur accélération du caillou à chaque instant.

Donnée

Intensité de la pesanteur : $g = 9,81$ N·kg⁻¹.



Solution rédigée

On utilise le Réflexe 2.

Expression des coordonnées du vecteur accélération dans ce repère

Exploitation de l'expression de l'accélération tangentielle

Exploitation de l'expression de l'accélération normale

On utilise le Réflexe 3.

Choix d'un référentiel galiléen adapté

1. a. On définit le repère de Frenet dont l'origine M est le caillou assimilé à un point matériel.

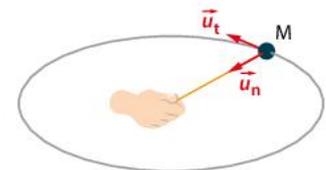
Dans ce repère, le vecteur accélération du caillou s'exprime par : $\vec{a} = \frac{v^2}{R} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t$.

Comme le caillou se déplace à vitesse constante, $a_t = \frac{dv}{dt} = 0$. L'accélération est donc orientée vers le centre.

Sa valeur est : $a = a_n = \frac{v^2}{R}$. Dans la situation étudiée, $R = L$.

On obtient donc $a = \frac{(7,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{0,50 \text{ m}}$ soit $a = 98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. On étudie le mouvement du caillou assimilé à un point matériel dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen.



Énoncé de la deuxième loi de Newton

D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système caillou, $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$.
Le vecteur somme des forces a même direction et même sens que le vecteur accélération et a pour valeur $\Sigma F = m \times a$, d'où $\Sigma F = 0,040 \text{ kg} \times 98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, soit $\Sigma F = 3,9 \text{ N}$.

Extraction de la grandeur recherchée

Le caillou est soumis à son poids, à l'action de l'air et à la force exercée par la corde. Le poids et l'action de l'air pouvant être négligés, la force exercée par la corde a donc pour valeur $F = 3,9 \text{ N}$.

On utilise le Réflexe 1.

Dérivation par rapport au temps des coordonnées du vecteur position

2. a. Le mouvement du petit caillou, assimilé à un point matériel M, est étudié dans un référentiel terrestre lié au sol supposé galiléen.

b. Le vecteur vitesse s'écrit $\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt}$.

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = 7,0 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ v_y = \frac{dy}{dt} = -9,8t \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}) \end{cases}$$

Dérivation par rapport au temps des coordonnées du vecteur vitesse

c. Le vecteur accélération s'écrit $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$.

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

Côté maths 1 : Écrire une dérivée – Dériver une fonction

Côté maths

On dispose de la fonction f définie pour tout x par :

$$f = 10x^2 - 8x + 5$$

1. Exprimer la dérivée f' de f sous la forme différentielle et donner l'expression de f' .
2. Calculer le nombre dérivé en $x = 1$.
3. Exprimer la dérivée seconde f'' de f sous la forme différentielle et donner l'expression de f'' .

Méthode

1. La notation différentielle f' de la dérivée de f s'écrit $\frac{df}{dx}$ et se lit : « dérivée de f par rapport à x ».

Les formules de dérivation conduisent à :

$$\frac{df}{dx} = f' = 20x - 8$$

2. Le nombre dérivé en $x = 1$ est $f'(1) = 12$.

3. La notation différentielle f'' de la dérivée seconde de f s'écrit $\frac{d^2f}{dx^2}$ et se lit : « dérivée seconde de f par rapport à x ». On peut encore écrire $\frac{d^2f}{dx^2} = \frac{df'}{dx}$.

Les formules de dérivation conduisent à : $\frac{d^2f}{dx^2} = f'' = 20$.

Côté physique & chimie

L'équation horaire, en unités SI, du mouvement d'un point mobile qui se déplace suivant un axe Ox est :

$$x = 10t^2 - 8t + 5$$

1. Exprimer la coordonnée v_x du vecteur vitesse de ce point mobile.
2. Calculer la valeur de la vitesse à la date $t = 1 \text{ s}$.
3. Exprimer la coordonnée a_x du vecteur accélération du point mobile.

Méthode

1. La coordonnée v_x du vecteur vitesse est la dérivée de l'abscisse du vecteur position par rapport au temps :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 20t - 8 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$$

2. À la date $t = 1 \text{ s}$, la coordonnée v_x est : $v_x(1) = 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pour ce mouvement selon l'axe Ox , la valeur de la vitesse à cette date est donc :

$$v(1) = \sqrt{v_x(1)^2 + v_y(1)^2} = \sqrt{v_x(1)^2 + 0^2} = 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. La coordonnée a_x du vecteur accélération est la dérivée seconde de l'abscisse x du vecteur position par rapport au temps. C'est aussi la dérivée de l'abscisse v_x du vecteur vitesse par rapport au temps :

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt} = 20 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-2})$$

À retenir !

	Fonctions généralement étudiées	Variable de dérivation	Notation de la dérivée
Mathématiques	Fonctions de x	x	f' ou $\frac{df}{dx}$
Physique-chimie	Fonctions du temps t	t	$\frac{dx}{dt}$, $\frac{dv_y}{dt}$, etc.

Parcours d'exercices CORRIGÉS

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Définir le vecteur vitesse et le vecteur accélération. Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées du vecteur position et/ou du vecteur vitesse.
- Citer et exploiter les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire.
- Caractériser le vecteur accélération pour quelques mouvements.
- Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées pour en déduire le vecteur accélération du centre de masse et la somme des forces appliquées au système.
- Capacité mathématique : dériver une fonction.

Appliquer le cours

S'entraîner

Vers le BAC

2 4

22

25 27

6

16

26

8

22

26

12

16

25

2 4

22

25 27

1 Les vecteurs position, vitesse et accélération

VIDÉO DE COURS Tracé d'un vecteur accélération – QR Code p. 14

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

Effectuer des calculs.

Les coordonnées du vecteur position d'un point matériel M dans un repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$ lié au référentiel d'étude sont données ci-dessous :

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

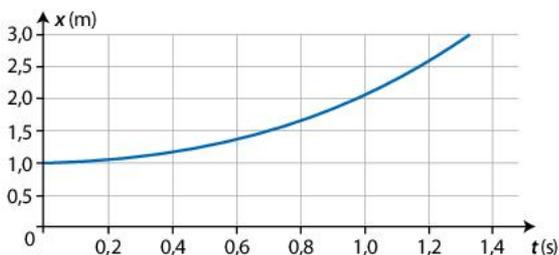
avec a et b constants.

- Déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse de M.

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

Exploiter un graphique.

On donne l'évolution de la position d'un point matériel P qui se déplace suivant un axe horizontal Ox , dans un repère orthonormé $(O; \vec{i}, \vec{j})$ lié au référentiel d'étude.



1. Rappeler l'interprétation graphique d'un nombre dérivé en mathématiques.
2. Déterminer alors la valeur de la vitesse de P à la date $t = 1,0$ s.

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

Effectuer des calculs.

Une bille assimilée à un point B est lancée verticalement à un instant $t = 0$ s. Ses positions sont repérées dans un repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$ lié à un référentiel terrestre par :

$$\overrightarrow{OB} \begin{cases} x = 0 \\ y = -4,9t^2 + 4,0t + 1,5 \end{cases} \quad \text{avec } x \text{ et } y \text{ en mètre, et } t \text{ en seconde.}$$

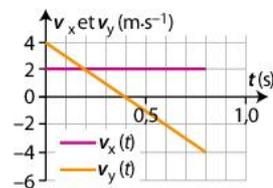
- Établir l'expression des coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse puis du vecteur accélération de la bille.

Utiliser le réflexe 1

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

Exploiter un graphique.

Une bille est lancée dans le plan vertical (Oxy) associé à un repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$ lié à un référentiel terrestre (voir graphique ci-contre).



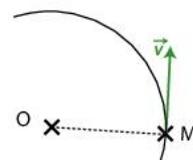
1. Déterminer l'expression des coordonnées cartésiennes v_x et v_y du vecteur vitesse.
2. Établir l'expression des coordonnées cartésiennes a_x et a_y du vecteur accélération.

2 Des exemples de mouvements

6 Étudier un mouvement circulaire

Faire un schéma adapté.

Un point matériel M décrit un mouvement circulaire uniforme autour d'un point O.



1. Reproduire le schéma, puis définir et représenter le repère de Frenet lié à M.

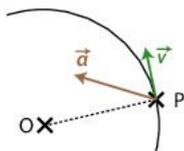
2. Exprimer les coordonnées du vecteur accélération \vec{a} de M dans ce repère.

Utiliser le réflexe 2

7 Exploiter la représentation d'un vecteur accélération

| Exploiter un schéma.

On a représenté sur le schéma ci-contre le vecteur accélération \vec{a} d'un point matériel P qui se déplace suivant une trajectoire circulaire autour d'un point O.



- Définir et représenter le repère de Frenet lié à P.
- Exprimer les coordonnées du vecteur accélération \vec{a} de P dans ce repère.

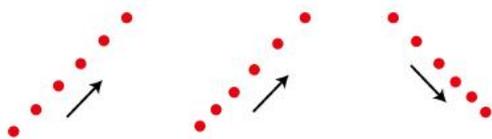
2. Le mouvement de P est-il uniforme ?

8 Exploiter les caractéristiques du vecteur accélération (1)

| Interpréter des observations.

Des mouvements d'un point matériel dans un référentiel terrestre sont étudiés ci-dessous.

- Relier chacun des pointages suivants aux caractéristiques du vecteur accélération \vec{a} qui lui correspondent.



\vec{a} { Direction : celle de la trajectoire
Sens : celui du mouvement

$$\vec{a} = \vec{0}$$

\vec{a} { Direction : celle de la trajectoire
Sens : opposé à celui du mouvement

9 Exploiter les caractéristiques du vecteur accélération (2)

| Faire un schéma adapté.

Le vecteur accélération d'un point matériel P en mouvement circulaire a pour coordonnées dans le repère de Frenet : $a_n = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et $a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

- Représenter, sans souci d'échelle, un pointage possible du mouvement de P.

3 La deuxième loi de Newton

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

| Mobiliser et organiser ses connaissances.

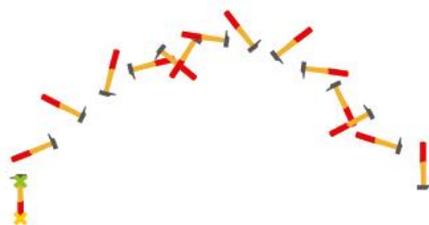
Un mobile autopporteur est lancé sur une table horizontale dans un référentiel terrestre considéré comme galiléen. On néglige toute force de frottement.

- Représenter la trajectoire du centre de masse de ce mobile.

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

| Exploiter un schéma.

On a filmé le mouvement d'un marteau lancé en l'air.

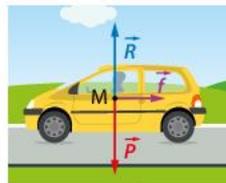


- Utiliser le schéma fourni et repérer le point jaune et le point vert pour chacune des positions du marteau.
- Justifier que le point vert est le centre de masse du marteau.
- Le marteau est-il soumis à des forces qui se compensent ?

12 Appliquer la deuxième loi de Newton (1)

| Utiliser un modèle pour prévoir.

Une voiture de masse $m = 900 \text{ kg}$ se déplace moteur arrêté sur une route horizontale. Elle ralentit sous l'effet des forces de frottements exercées par l'air et par la route sur les pneus.



Toutes les forces qui s'appliquent sur la voiture sont représentées en son centre de masse M sans souci d'échelle. Le poids \vec{P} du véhicule et la réaction \vec{R} de la route sur les pneus se compensent. La valeur de la force de frottement est $f = 300 \text{ N}$.

- Énoncer la deuxième loi de Newton.
- Exploiter cette loi pour déterminer les caractéristiques du vecteur accélération de M.

Utiliser le réflexe 5

13 Appliquer la deuxième loi de Newton (2)

| Utiliser un modèle pour décrire.

Une montgolfière et l'air qu'elle contient (masse $m = 1,20 \times 10^4 \text{ kg}$) sont animés d'un mouvement vertical uniformément accéléré vers le haut. La valeur de l'accélération est $a = 0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



La montgolfière est soumise à son poids \vec{P} et à la poussée d'Archimède \vec{F}_p exercée par l'air extérieur. On néglige les forces de frottement devant les autres forces. Les forces sont représentées sans souci d'échelle au centre de masse du système sur le schéma ci-dessus.

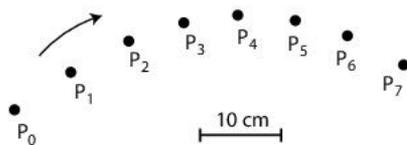
- Déterminer les caractéristiques de la somme des forces $\Sigma \vec{F}$ appliquées au système.
- En déduire la valeur F_p de la poussée d'Archimède.

Donnée

Intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

14 Le point sur les vecteurs

Construire des vecteurs.



Le document ci-dessus est l'enregistrement du mouvement du centre de masse P d'un mobile autoporteur. La durée qui sépare deux positions successives de P est $\Delta t = 40$ ms.

1. Reproduire le pointage. Construire en P_2 et en P_3 les vecteurs vitesse \vec{v}_2 et \vec{v}_3 en précisant l'échelle utilisée.
2. Construire en P_3 le vecteur variation de vitesse $(\Delta\vec{v})_{2 \rightarrow 3}$.
3. Construire en P_3 le vecteur accélération \vec{a}_3 en précisant l'échelle utilisée.

15 Ion acceleration

Pratiquer une langue vivante étrangère.



Orsay's Linear Accelerator

The highly energetic ion beams are used in material physics and radiobiology to study the influence of this radiation on matter and life.

An Al^{3+} ion enters a linear accelerator which maintains a voltage $U = 1\,000$ V between its electrodes. The distance between the electrodes is $d = 20$ cm. The ion is subjected to an electrostatic force of value

$$F = \frac{|q| \times U}{d}$$

1. Calculate F .
2. Check that the weight of the ion is negligible compared to the value F .
3. Determine the value of the ion acceleration.

Data

- Elementary charge: $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C.
- Mass of ion Al^{3+} : $m = 4.48 \times 10^{-26}$ kg.
- $g = 9.81$ m \cdot s $^{-2}$.

16 Connaître les critères de réussite

Virage d'un avion

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs.

On s'intéresse au mouvement du centre de masse G d'un avion de 50 tonnes qui entame un virage contenu dans le plan horizontal. Lors du virage, la trajectoire de G est une portion de cercle de rayon $R = 10\,000$ m, et sa vitesse a une valeur constante $v = 800$ km \cdot h $^{-1}$.



1. Déterminer la valeur a_G de l'accélération du centre de masse de l'avion au cours du virage.
2. Déterminer la valeur ΣF de la somme des forces qui s'appliquent sur l'avion dans cette situation.

Critères de réussite



- J'ai explicité les notations utilisées pour la masse et le repère de Frenet (question 1).
- J'ai donné le résultat avec un nombre de chiffres significatifs et une unité adaptés (question 1).
- J'ai été rigoureux sur les notations des vecteurs ($\vec{a}_G, \Sigma \vec{F}$) et de leur valeur ($a_G, \Sigma F$) (questions 1 et 2).

17 Saut au-dessus du canal de Corinthe

Mobiliser et organiser ses connaissances ; exploiter des informations.

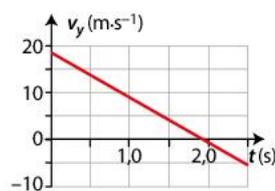
En avril 2010, le pilote de moto Robbie MADDISON a pris son élan pour franchir le canal de Corinthe. Le mouvement du centre de masse G du système {R. MADDISON et sa moto} est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen. À l'instant $t = 0$ s, il se trouve à l'origine du repère et quitte le tremplin. Son vecteur vitesse \vec{v}_0 fait un angle $\alpha = 33^\circ$ avec l'axe horizontal et a pour valeur 125 km \cdot h $^{-1}$.

1. a. Utiliser la chronophotographie ci-dessous pour montrer que le mouvement suivant l'axe (Ox) est uniforme.



- b. Montrer que si le poids est la seule force qui s'applique sur le système, le vecteur accélération est vertical.
- c. Vérifier que les réponses aux deux questions précédentes sont cohérentes entre elles.

2. a. En utilisant l'allure de la courbe ci-contre, justifier que le mouvement suivant l'axe vertical est uniformément varié.

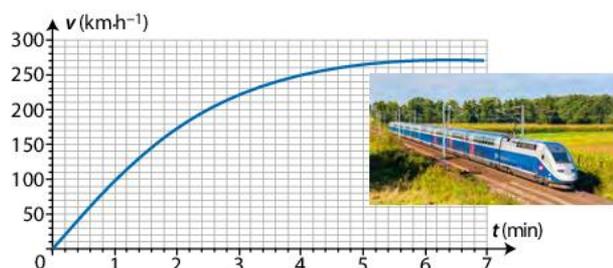


- b. Quelle position particulière de la trajectoire est occupée par G à la date pour laquelle $v_y = 0$? Quelle est alors la valeur de la vitesse ?

18 Accélération d'un TGV

Exploiter un graphique.

L'étude du mouvement du centre de masse G d'une rame de TGV se déplaçant en ligne droite donne les résultats suivants :



1. Expliquer comment déterminer graphiquement la valeur a_G de l'accélération.
2. Comment la valeur de l'accélération évolue-t-elle au cours du temps ?
3. Caractériser le vecteur accélération à $t = 2$ min, instant de la photographie.

19 Accélération d'un parachutiste

Exploiter un tableau ; effectuer des calculs ; interpréter des résultats.

La somme \vec{f} des forces exercées par l'air sur un parachutiste de masse $m = 80$ kg en chute verticale est verticale vers le haut, et sa valeur est variable.

On définit un axe vertical Oy orienté dans le sens du mouvement.

Phase 1	Phase 2	Phase 3
$f = 0$ N	$f = 300$ N	$f = 800$ N

1. Établir l'inventaire des forces qui s'exercent sur le parachutiste pour chaque phase du saut. Faire un schéma de ces forces sans souci d'échelle mais de façon cohérente.
2. Pour chacune des phases :
 - a. déterminer les caractéristiques du vecteur accélération \vec{a}_G du centre de masse G du parachutiste ;
 - b. donner la nature du mouvement de G.

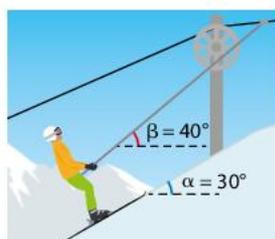
Donnée

Intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

20 Le télési

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs.

Une skieuse de masse $m = 60$ kg est accrochée à la perche d'un télési et se déplace avec une vitesse de valeur constante. Le télési exerce sur la skieuse une force constante \vec{F} dans l'axe de la perche. Les forces de frottement exercées par l'air et par la neige sont négligées.



1. Établir l'inventaire des forces exercées sur la skieuse et représenter l'ensemble de ces forces sans souci d'échelle au centre de masse G de la skieuse.

2. Exprimer les coordonnées de chacune des forces dans un repère cartésien $(O ; \vec{i}, \vec{j})$ dont l'axe Ox est parallèle à la pente.
3. Calculer la valeur F de la force exercée par la perche sur la skieuse.

Donnée

Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

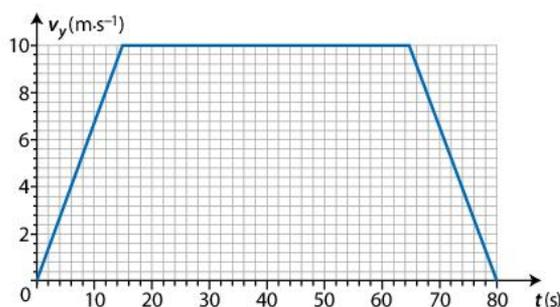
21 La cabine d'ascenseur

Exploiter un graphique ; mobiliser et organiser ses connaissances.



À Dubaï, le Būj Khalifa, plus haut gratte-ciel du monde, est équipé d'un ascenseur pouvant se déplacer à $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Le graphique ci-après donne l'évolution de la coordonnée verticale v_y de la vitesse de l'ascenseur en fonction du temps.

L'axe vertical Oy est ascendant.



1. Calculer la coordonnée a_y de l'accélération de la cabine d'ascenseur pendant chaque phase du mouvement.
2. Une personne de masse $m = 70$ kg se trouve dans la cabine.
 - a. Établir l'inventaire des forces s'exerçant sur elle.
 - b. Par application de la deuxième loi de Newton, déterminer la valeur de la force \vec{R} exercée par le sol de l'ascenseur sur la personne lors de chaque phase.
 - c. Quel sera à chaque fois le ressenti de la personne dans l'ascenseur ?

Donnée

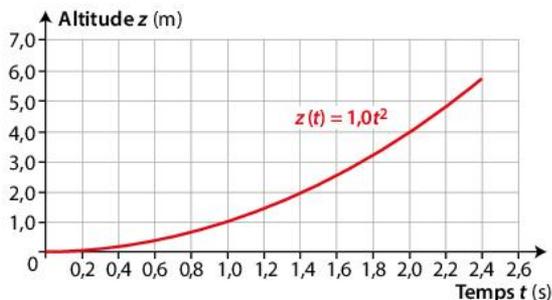
Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Côté maths

→ Côté maths 1, p. 17

22 Dériver une fonction

On étudie le mouvement d'un drone, assimilé à un point matériel D, dans un référentiel terrestre supposé galiléen. L'exploitation du film de son décollage vertical a permis d'obtenir les résultats suivants :



1. Établir l'expression $v_z(t)$ de la coordonnée suivant l'axe vertical (Oz) du vecteur vitesse du drone.
2. Tracer, en utilisant une échelle appropriée, l'allure de la courbe $a_z = f(t)$. Caractériser le vecteur accélération du drone au cours du mouvement.

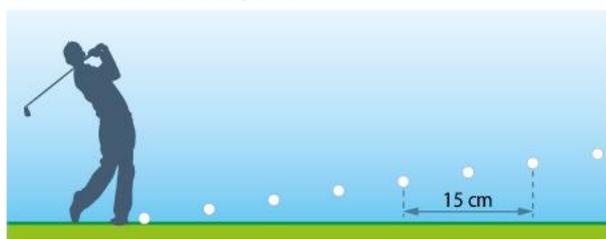
23 À chacun son rythme

Vol d'une balle de golf

Mobiliser et organiser ses connaissances ; rédiger une explication.

Commencer par résoudre l'énoncé compact. En cas de difficultés, passer à l'énoncé détaillé.

Le swing d'un joueur de golf expérimenté permet d'envoyer une balle à une distance voisine de 250 m. Les huit premières positions d'une balle de golf sont pointées ci-dessous toutes les 1,0 ms.



L'étude du mouvement de la balle dans un repère cartésien ($O ; x, y$) montre qu'elle touche le sol à une distance $D = \frac{v_0^2 \times \sin 2\theta}{a}$ de O , appelée « portée du swing ». Dans cette relation, θ est l'angle entre le sol horizontal et le vecteur vitesse initiale \vec{v}_0 de la balle ; a est la valeur constante de son accélération.

Lorsque le golfeur imprime à la balle un mouvement de rotation arrière, appelé *backspin*, la balle se met en rotation à grande vitesse et est alors soumise à une force verticale \vec{F} considérée comme constante, orientée vers le haut.

Énoncé compact

Vérifier que la portée du swing correspond à la distance annoncée dans le texte introductif.

Énoncé détaillé

1. Déterminer, à l'aide du pointage, la valeur de la vitesse initiale \vec{v}_0 de la balle.
2. Établir l'inventaire des forces qui s'exercent sur la balle lors de son mouvement.
3. Par application de la deuxième loi de Newton, déterminer la valeur a de l'accélération de la balle.
4. Vérifier que la portée du swing correspond à la distance annoncée dans le texte introductif.

Données

- Masse de la balle : $m = 46 \text{ g}$.
- Valeur de la force $\vec{F} : F = 5,0 \times 10^{-2} \text{ N}$.
- $\theta = 11^\circ$.
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

24 Python

Vecteur accélération

Utiliser un langage de programmation.

À l'aide d'un logiciel de pointage vidéo, on repère les positions du centre de masse d'un ballon de basket au cours d'un lancer. Un tableau de données est généré. Il indique, à différentes dates, les coordonnées des positions du système étudié, lorsqu'il a quitté les mains de la basketteuse. Un programme en langage python, dont un extrait est donné ci-dessous, permet d'extraire les données du pointage, puis de représenter les vecteurs accélération en différentes positions.

PROGRAMME Python – Lien p. 14

```

35  "Calcul des coordonnées vx et vy des
    vecteurs vitesse"
36  vx=[ ]
37  for i in range(len(x)-1) :
38      vx=vx+[(x[i+1]-x[i])/(t[i+1]-t[i])]
39
40  vy=[ ]
41  for i in range(len(y)-1) :
42      vy=vy+[(y[i+1]-y[i])/(t[i+1]-t[i])]
43
44  "Calcul des coordonnées ax et ay des
    vecteurs accélération"
45  ax=[ ]
46  for i in range(len(vx)-1) :
47      ax=
48
49  ay=[ ]
50  for i in range(len(vy)-1) :
51      ay=
    
```

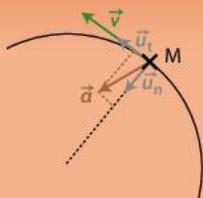
1. Par analogie avec le calcul des coordonnées v_x et v_y du vecteur vitesse, compléter les lignes 47 et 51 afin de calculer les coordonnées a_x et a_y du vecteur accélération.
2. Mettre en œuvre le programme pour tracer le vecteur accélération en différentes positions de la trajectoire.
3. Donner les caractéristiques du vecteur accélération du centre de masse du système.
4. Rappeler les caractéristiques du vecteur champ de pesanteur terrestre \vec{g} .
5. À l'aide de la deuxième loi de Newton, montrer que le modèle de la chute libre est ici valide.

Ne pas confondre les expressions des composantes normale et tangentielle de l'accélération

Dans le repère de Frenet :

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

Coordonnée normale



Coordonnée tangentielle

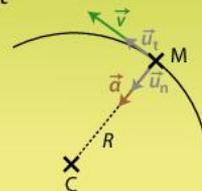
Ne pas confondre vecteur et valeur d'un vecteur



Dans le cas du mouvement circulaire uniforme :
 $v = \text{cte}$ mais $\vec{v} \neq \text{cte}$
 DONC

$$\frac{dv}{dt} = 0 \text{ mais } \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a} \neq \vec{0}$$

Il y a une accélération !



Préparation à l'écrit

→ Les bons réflexes 1, 2 et 3 sont présentés p. 16

25 min CORRIGÉ

Le thermomètre de Galilée

Faire un schéma adapté ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique.

Le liquide d'un thermomètre de Galilée a une masse volumique $\rho_\ell(\theta)$ qui décroît lorsque sa température augmente.



Partie I Étude théorique du mouvement

Le liquide du thermomètre est à 18°C ; à cette température, l'ampoule portant le médaillon « 18°C », de $12,0\text{ g}$ et de volume V , flotte. On chauffe le liquide jusqu'à 20°C , l'ampoule descend alors dans le tube.

On prend pour origine des dates ($t = 0\text{ s}$) l'instant où l'ampoule se met en mouvement.

On modélise la valeur f de la force de frottement fluide exercée par le liquide sur l'ampoule par $f = k \times v_G$, avec v_G la valeur de la vitesse du centre de masse de l'ampoule

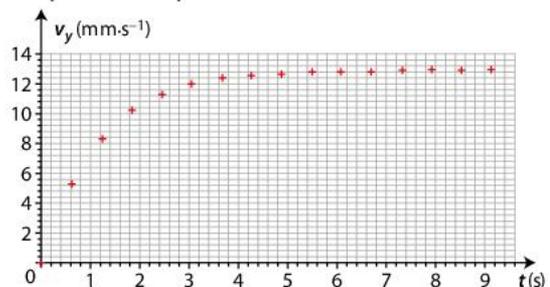
et k le coefficient de frottement. La force F_p exercée par le liquide, appelée poussée d'Archimède, est une force verticale, orientée vers le haut ayant pour valeur $F_p = \rho_\ell \times V \times g$. On définit un axe Oy dirigé vers le bas dont l'origine O coïncide avec le centre de masse de l'ampoule portant le médaillon « 18°C » à la date $t = 0\text{ s}$.

1. Représenter, sans souci d'échelle mais de façon cohérente, les forces s'exerçant sur l'ampoule en mouvement.
2. Montrer que les valeurs a_G de l'accélération et v_G de la vitesse de G sont liées par $a_G = A - B \times v_G$. Exprimer A et B en fonction de m , g , k , $\rho_\ell(\theta)$ et V .

Utiliser le réflexe 3

Partie II Étude expérimentale du mouvement

Une capture vidéo permet d'obtenir la courbe ci-dessous.



1. Justifier que l'ampoule atteint une vitesse de valeur constante v_ℓ et la déterminer.

2. Montrer que $v_\ell = \frac{A}{B}$.

Données

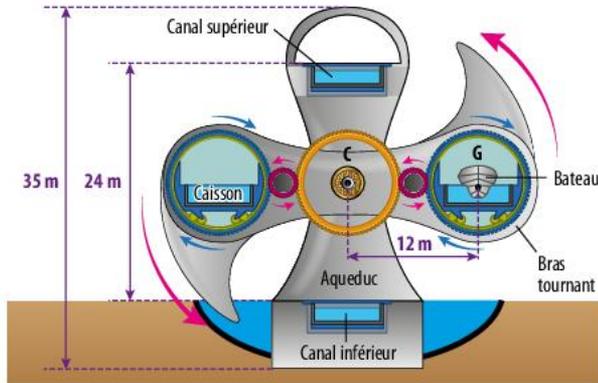
- Volume de l'ampoule : $V = \frac{4}{3} \pi \times R^3$.
- Masse volumique du liquide à 20°C : $\rho_\ell = 848\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- Coefficient de frottement : $k = 8,8 \times 10^{-3}\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,81\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Un ascenseur à bateau

Faire un schéma adapté ; mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique et argumenter.

D'après Baccalauréat Amérique du Sud, 2016

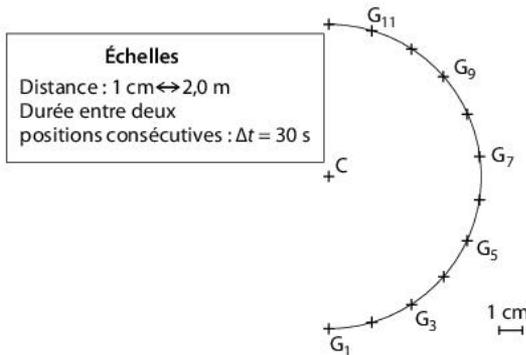
La Roue de Falkirk est un ascenseur rotatif à bateaux construit près de la ville de Falkirk dans le centre de l'Écosse. Après trois ans de travaux, cet ascenseur a été inauguré par la Reine en mai 2002. Le bras tournant comporte deux godets remplis d'eau, situés à chacune de ses extrémités. Un système de roues dentées permet la rotation du bras.



Dans un référentiel terrestre considéré galiléen, le système étudié est un godet contenant de l'eau et un bateau dont le centre de masse est G.

Partie I Le système d'enregistrement du mouvement

Un dispositif de pointage a permis de repérer la position de G lors du fonctionnement de l'ascenseur.



- Donner la nature du mouvement de G.
- Exprimer les coordonnées du vecteur accélération du centre de masse du système, dans un repère de Frenet.

Partie II Le roulis

Le roulis est un mouvement d'oscillations latérales du bateau. Afin que le roulis soit négligeable lors de l'ascension, la valeur de l'accélération du centre de masse du système, dans son mouvement de rotation autour de C, doit être faible : elle ne doit pas dépasser un centième de l'accélération de la pesanteur terrestre ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

- Le roulis est-il ici négligeable ?

Coup de pouce QR Code p. 14

Utiliser le réflexe 2

Exercice Type SI

Retransmission par caméra mobile

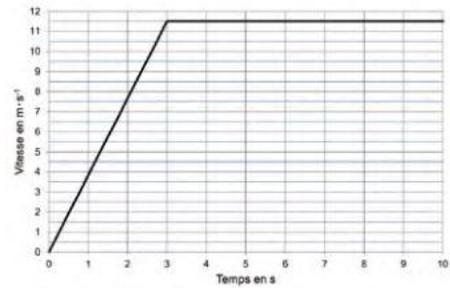
Mobiliser et organiser ses connaissances ; faire preuve d'esprit critique.

Pour filmer un 100 m en athlétisme, on utilise le système X-track qui est une caméra motorisée sur rails parallèlement à la piste.

Le record actuel de cette épreuve est 9,58 s. La figure ci-dessous présente la consigne de vitesse du X-track.



Graphique A



- Caractériser la nature du mouvement du X-track :
 - pendant la phase 1 ($0 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$) ;
 - pendant la phase 2 ($3 \text{ s} \leq t \leq 10 \text{ s}$).
- La situation initiale est schématisée ci-dessous.



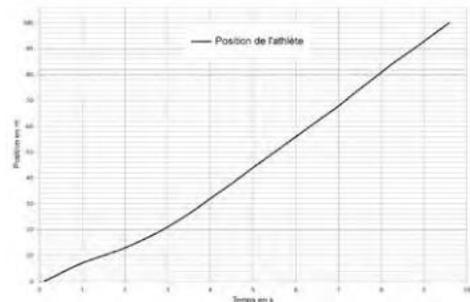
- Justifier que les équations de la position du X-track durant les deux phases données ci-dessous, sont en accord avec le graphique A :

– phase 1 : $x_{\text{X-track}} = 1,92 \times t^2 + 5$
 – phase 2 : $x_{\text{X-track}} = 11,5 \times (t - 3) + 22,2$

Utiliser le réflexe 1

- Tracer la courbe de position du X-track en fonction du temps sur le graphique B ci-dessous.

Graphique B



- Préciser qui de l'athlète courant le 100 m en 9,58 s ou du X-track arrive en premier.
 - Indiquer la différence de position entre le X-track et l'athlète à l'instant où ce dernier franchit la ligne d'arrivée.

2

Mouvement dans un champ uniforme



Ashleigh BARTY est réputée pour la qualité de son service.

- Comment la connaissance des conditions initiales du mouvement de la balle permet-elle de prévoir si elle passera au-dessus du filet ?

➤ Rendez-vous : Exercice 16 p. 41

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Établir et exploiter les équations horaires du mouvement. Établir l'équation de la trajectoire. **Activité 1 p. 27**
- Utiliser des capteurs ou une vidéo pour déterminer les équations horaires du mouvement du centre de masse d'un système dans un champ uniforme. **Activité 1 p. 27**
- Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme. **Activité 3 p. 29**
- Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique. **Activité 2 p. 28**
- **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. **Activité 2 p. 28**
- **Capacité mathématique** : déterminer la primitive d'une fonction. **Exercice 17 p. 41**

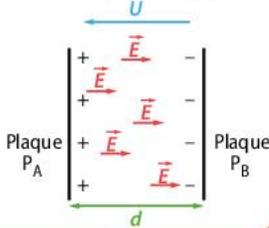
Champs, forces et théorème de l'énergie cinétique

Un champ vectoriel est représenté par un vecteur. Il a une direction, un sens et une valeur.

Champ de pesanteur terrestre

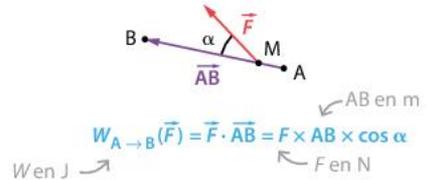


Champ électrique entre les armatures d'un condensateur plan



Champ vectoriel

Une force qui s'exerce sur un système M se déplaçant d'une position A à une position B peut effectuer un travail.



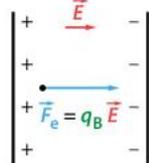
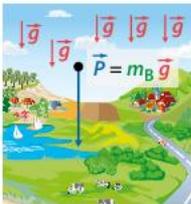
Le travail est une forme de transfert d'énergie.

Force et travail

CHAMPS, FORCES, THÉORÈME DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE

Force et champ

Dans une région de l'espace où règne un champ, tout objet B aux propriétés physiques appropriées y subit une force :



Théorème de l'énergie cinétique

La variation de l'énergie cinétique d'un système en mouvement, d'une position A à une position B, est égale à la somme des travaux de toutes les forces appliquées au système entre A et B :

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

← \mathcal{E}_C en J ← W en J

Réactiver ses connaissances

▶ VIDÉO Théorème de l'énergie cinétique – QR Code p. 34

Une plongeuse s'élance sans vitesse initiale d'une hauteur de 5,0 m au-dessus de l'eau.

- En supposant que la plongeuse, au cours de sa chute, n'est soumise qu'à son poids, calculer la valeur de la vitesse avec laquelle elle pénètre dans l'eau.

Donnée

Intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



Flash test

5 min

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s).

	A	B	C
1. Une particule de charge $q = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$ est placée dans un champ électrique \vec{E} de valeur $2,0 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$. La valeur F de la force électrique qu'elle subit vaut :	$6,4 \times 10^{16} \text{ N}$	$6,4 \times 10^{-16} \text{ N}$	$1,6 \times 10^{-22} \text{ N}$
2. Au cours de sa chute libre, la pomme accélère. Le travail du poids : 	est positif.	est négatif.	est nul.
3. Lorsqu'un système en mouvement n'est soumis qu'à des forces qui ne travaillent pas, son énergie cinétique :	augmente.	diminue.	reste constante.

Activité 1 expérimentale

Mouvement dans un champ de pesanteur

Notions

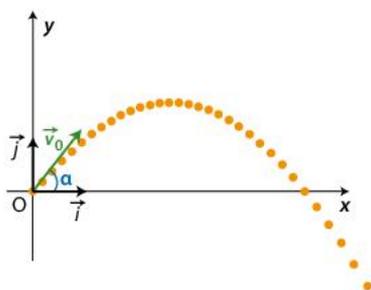
- Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme
- Équation d'une trajectoire

La pétanque est un jeu qui consiste à lancer une boule le plus près possible du « cochonnet ». Le terrain de jeu est horizontal. Un joueur lance sa boule. Après une trajectoire en cloche, elle retombe sur le sol et roule pour s'arrêter au plus près du cochonnet.

► **Objectif de l'activité :** Comment établir et exploiter l'équation de la trajectoire d'un projectile dans un champ de pesanteur uniforme ?



A Pointage d'un lancer de boule de pétanque



PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

On modélise le mouvement d'une boule de pétanque par celui du centre de masse M d'un projectile.

- ✓ FILMER le mouvement du projectile lors d'un lancer ou utiliser la vidéo fournie.
- ✓ CHOISIR un repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$ dont l'origine correspond à la position initiale de M.
- ✓ INDIQUER l'échelle de représentation à partir d'un étalon figurant sur l'image.
- ✓ POINTER les positions consécutives occupées par M au cours du temps.

COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

Coordonnées des vecteurs accélération, vitesse et position d'un point mobile M

- On se place dans un repère cartésien $(O; \vec{i}, \vec{j})$ dont l'origine correspond à la position initiale de M.
- Le point mobile est lancé avec la vitesse initiale \vec{v}_0 faisant un angle α avec l'horizontale.
- Les actions de l'air sur M sont négligées.

Vecteur accélération de M

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

Vecteur vitesse de M

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

Vecteur position de M

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

avec g l'intensité de la pesanteur égale à $9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Équation de la trajectoire d'un point mobile M

- Dans le repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$ choisi, l'équation de la trajectoire est de la forme $y = f(x)$.
- La détermination de l'équation de la trajectoire $y = f(x)$ nécessite d'éliminer le temps en combinant les équations horaires $x = g(t)$ et $y = h(t)$ du mouvement de M.

▶ VIDÉO Lancer d'une boule de pétanque – QR Code p. 34

Pratique expérimentale

Mettre en œuvre un protocole RÉA

- Mettre en œuvre le PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL permettant de déterminer les coordonnées, dans le repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$ choisi, des vecteurs position \overrightarrow{OM} , vitesse \vec{v} et accélération \vec{a} du centre de masse M du projectile.

Exploiter des résultats ANA-RAIS

- Déterminer la valeur v_0 de la vitesse initiale de M, ainsi que l'angle α du lancer.

Discuter un modèle VAL

- Vérifier, par traitement graphique et en utilisant les fonctionnalités de modélisation du logiciel tableur, que les coordonnées de M sont conformes à celles données dans le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE.

Effectuer des calculs RÉA

- Établir, à l'aide du COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE et des équations précédentes, l'équation $y = f(x)$ de la trajectoire de M.

Interpréter des résultats VAL

- Un joueur veut placer sa boule devant le cochonnet situé à 6,1 m de lui. Il lance la boule depuis une hauteur égale à 1,1 m du sol, avec un angle α égal à 51° et une vitesse initiale de valeur $v_0 = 7,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le joueur a-t-il réussi son lancer ?

Un pas vers le cours

Utiliser un vocabulaire scientifique adapté et rigoureux COM

- Comment établir et exploiter l'équation de la trajectoire d'un projectile dans un champ de pesanteur uniforme ?

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

Notion

Aspects énergétiques d'un système en mouvement dans un champ uniforme

Au cours d'une partie de pétanque, une boule métallique décrit une trajectoire parabolique. Lors du lancer, le joueur communique de l'énergie à la boule.

► **Objectif de l'activité :** Quelles conversions d'énergie ont lieu lors d'un mouvement de chute libre d'un système dans un champ de pesanteur ?

A Les différentes formes d'énergie d'un système de masse m

Énergie cinétique \mathcal{E}_c

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m v^2$$

m en kg, v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, \mathcal{E}_c en J

avec v la valeur de la vitesse du centre de masse du système.

Énergie potentielle de pesanteur \mathcal{E}_p

$$\mathcal{E}_p = m \times g \times z$$

m en kg, g en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$, z en m, \mathcal{E}_p en J

avec z l'altitude repérée sur un axe (Oz) orienté vers le haut et g l'intensité de la pesanteur. À l'altitude $z = 0$ m choisie comme référence, $\mathcal{E}_p = 0$ J.

Énergie mécanique \mathcal{E}_m

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p$$

\mathcal{E}_m , \mathcal{E}_c et \mathcal{E}_p en J

Cette énergie se conserve si le travail des forces non conservatives est nul.

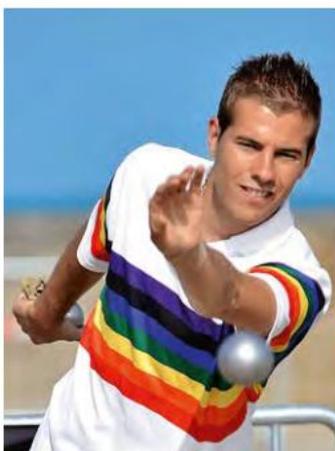
B Programme permettant l'étude énergétique d'un système en mouvement

Un programme informatique en langage python permet de tracer les courbes représentant l'évolution des énergies cinétique, potentielle de pesanteur et mécanique du système {boule de pétanque} au cours du temps.

lycee.hachette-education.com/physique-si/tle



Programme python à télécharger



```

30 v=[]
31 for i in range(len(vx)) :
32     v=v+[(vx[i]**2+vy[i]**2)**0.5]
33 #masse du système en kg
34 m=0.60
35 #intensité de la pesanteur
36 g=9.81
37 #Calcul des énergies
38 Ep=[]
39 for i in range(len(vx)) :
40     Ep=Ep+[m*g*y[i]]
41 Ec=[]
42 for i in range(len(vx)) :
43     Ec=
44 Em=[]
45 for i in range(len(vx)) :
46     Em=Em+[Ep[i]+Ec[i]]
47 plt.show()
    
```

Simulation numérique

Utiliser un langage de programmation RÉA

- Compléter la ligne de code masquée permettant de calculer l'énergie cinétique du système.

Interpréter des résultats VAL

- Exécuter le programme python fourni.
 - Justifier l'allure des courbes \mathcal{E}_p et \mathcal{E}_c en fonction du temps.

Interpréter des résultats VAL

- Déduire des courbes :
 - l'altitude maximale z_{max} atteinte par la boule ;
 - la valeur v_{sol} de la vitesse de la boule lorsqu'elle atteint le sol.

Discuter une hypothèse VAL

- Discuter l'hypothèse d'une chute libre de la boule.

Interpréter des résultats VAL

- Un joueur souhaite que sa boule percute directement une boule de son adversaire située sur le sol à 7,0 m de lui. Peut-il réussir son lancer ?

Un pas vers le cours

Utiliser un vocabulaire scientifique adapté et rigoureux COM

- Quelles conversions d'énergie ont lieu lors d'un mouvement de chute libre d'un système dans un champ de pesanteur ?

Activité 3 documentaire

Accélérer des électrons dans un microscope électronique

Un MEB est un microscope électronique à balayage capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Pour cela, le faisceau de lumière a été remplacé par un faisceau d'électrons produits et accélérés par un canon à électrons.

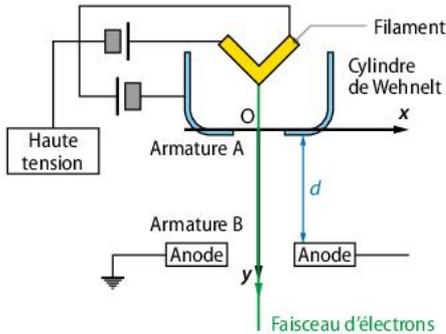
► **Objectif de l'activité :** Comment déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée, accélérée par un champ électrique uniforme ?

Notions

- Champ électrique créé par un condensateur plan
- Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme



A Canon à électrons d'un MEB



Un canon à électrons est constitué d'un filament qui, lorsqu'il est porté à haute température, émet au point O des électrons de vitesse initiale de valeur négligeable. Ces électrons sont ensuite accélérés à l'intérieur d'un condensateur constitué des armatures A et B distantes de 10 mm et entre lesquelles règne un champ électrique uniforme de valeur E .

B Caractéristiques du canon à électrons d'un MEB

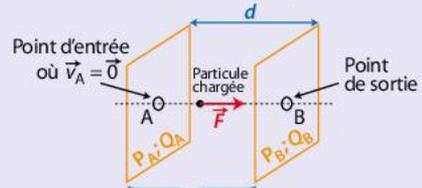
Le potentiel d'accélération, qui correspond à la tension électrique appliquée entre les armatures A et B du canon à électrons, est $U_{AB} = -10 \text{ kV}$.

COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

Accélération dans un champ électrique uniforme

Un condensateur plan permet d'obtenir un champ électrique uniforme \vec{E} entre ses deux plaques lorsque l'on applique une tension électrique U_{AB} entre les plaques.

Plaques chargées et parallèles d'un condensateur plan



Zone de l'espace où règne un champ électrique \vec{E} uniforme

- Direction :** perpendiculaire aux plaques
- Sens :** de la plaque chargée positivement vers la plaque chargée négativement
- Valeur :** $E = \frac{|U_{AB}|}{d}$ en $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$

Le travail de la force électrique qui s'exerce sur la particule de charge q et dont le point d'application se déplace de la position A à la position B est : $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = q \times U_{AB}$.

Données

- Masse de l'électron : $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- Charge d'un électron : $q = -e = -1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Analyse des documents

Rédiger une explication COM

- Préciser la direction et le sens du champ électrique \vec{E} régnant entre les armatures A et B permettant l'accélération des électrons dans le canon à électrons (doc. A)
 - Déterminer le signe des charges portées par les armatures A et B.

Effectuer des calculs RÉA

- À l'aide des données du doc. B et du COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE :
 - Donner l'expression de la valeur F de la force électrique qui s'exerce sur un électron crée en O.
 - Justifier par un calcul qu'il est possible de négliger le poids de l'électron devant la force électrique qu'il subit.

Effectuer des calculs RÉA

- Par application du théorème de l'énergie cinétique, montrer que la vitesse atteinte par un électron à la sortie du canon à électron a pour valeur :

$$v_B = \sqrt{\frac{2(-e) \times U_{AB}}{m_e}}$$

Interpréter des résultats VAL

- Montrer qu'à des potentiels d'accélération de l'ordre de 10 kV, l'électron atteint, à l'anode, une vitesse dont la valeur est d'environ 20 % de celle de la lumière.

Un pas vers le cours

Utiliser un vocabulaire scientifique adapté et rigoureux COM

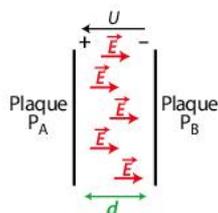
- Comment déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée, accélérée par un champ électrique uniforme ?

A Champ de pesanteur uniforme



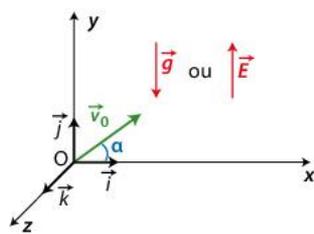
Si on se déplace peu à la surface de la Terre, \vec{g} est un vecteur constant. À Paris, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

B Champ électrique créé par un condensateur plan



La valeur de \vec{E} est : $E = \frac{|U|}{d}$.

C Situation à l'instant initial



\vec{g} est toujours vertical vers le bas ; \vec{E} est choisi ici vertical et vers le haut.

1 Des champs uniformes

Un **champ vectoriel uniforme** est un champ qui garde, en tout point d'une région de l'espace, la même direction, le même sens et la même valeur.

- Le champ de pesanteur terrestre \vec{g} est assimilable au champ de gravitation terrestre au voisinage de la Terre.

Il est dirigé suivant la **verticale du lieu**, orienté **vers le bas** et a une **valeur g** qui dépend de l'altitude et de la latitude du lieu considéré (doc. A).

Dans une région de l'espace de **faibles dimensions** par rapport à la Terre, un **champ de pesanteur \vec{g}** peut être considéré comme **uniforme**.

- Un condensateur plan est constitué de deux plaques conductrices planes, parallèles et séparées d'une distance d (schéma B).

Lorsqu'on applique une tension électrique U entre les plaques d'un **condensateur plan**, elles se chargent électriquement. Il apparaît alors entre elles un **champ électrique \vec{E} uniforme** dont les caractéristiques sont :

- direction : perpendiculaire aux plaques ;
- sens : de la plaque chargée positivement vers la plaque chargée négativement ;
- valeur : d'autant plus élevée que la valeur absolue de la tension U est grande et que la distance d entre les plaques est faible.

2 Le mouvement dans un champ uniforme

Le système étudié est un point matériel ou le centre de masse M d'un corps.

Le mouvement du système, dans un champ uniforme vertical, est étudié dans un référentiel terrestre considéré comme galiléen.

À la date $t = 0 \text{ s}$, le vecteur vitesse initiale \vec{v}_0 du système est contenu dans le plan (Oxy) .

L'étude se fait dans un repère orthonormé de l'espace $(O; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ dont l'origine O est par exemple choisie en la position initiale du système (schéma C). On se place dans le cas où le système est **uniquement** soumis à son poids ou à une force électrique.

La deuxième loi de Newton, ainsi que les définitions des vecteurs position, vitesse et accélération permettent d'étudier le mouvement du système.

a. Détermination du vecteur accélération

Le vecteur accélération du système est obtenu par application de la **deuxième loi de Newton**.

Mouvement dans un champ de pesanteur

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \text{ soit } m\vec{g} = m\vec{a} \text{ et ainsi } \vec{a} = \vec{g}.$$

Le vecteur accélération est vertical vers le bas.

Le vecteur accélération a pour coordonnées cartésiennes :

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

Mouvement dans un champ électrique vertical

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \text{ soit } q\vec{E} = m\vec{a} \text{ et ainsi } \vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E}.$$

Le vecteur accélération est vertical, de même sens que \vec{E} si la charge q est positive, et de sens contraire sinon.

Le vecteur accélération a pour coordonnées cartésiennes :

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

lycee.hachette-education.com/physique-si/tle



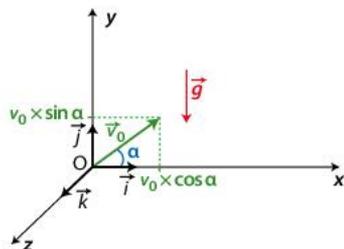
b. Détermination du vecteur vitesse

- Puisque le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps, les coordonnées du vecteur vitesse sont obtenues en recherchant les **primitives par rapport au temps** des coordonnées du vecteur accélération.
- Les **constantes d'intégration** apparues dans les primitives sont déterminées à l'aide des **conditions initiales** : les coordonnées du vecteur vitesse à l'instant initial.

Mouvement dans un champ de pesanteur

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \\ a_z = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{primitive}} \vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = -g \times t + C_y \\ v_z = C_z \end{cases}$$

Utilisation des coordonnées de \vec{v}_0 :



$$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = v_0 \times \cos \alpha = C_x \\ v_{y_0} = v_0 \times \sin \alpha = -g \times 0 + C_y \\ v_{z_0} = 0 = C_z \end{cases}$$

Il vient :

$$\begin{cases} C_x = v_0 \times \cos \alpha \\ C_y = v_0 \times \sin \alpha \\ C_z = 0 \end{cases}$$

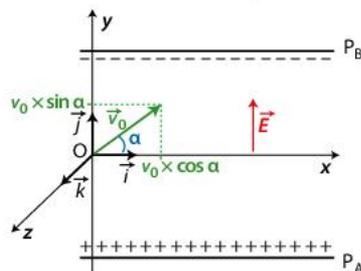
Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse sont donc :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos \alpha \\ v_y = -g \times t + v_0 \times \sin \alpha \\ v_z = 0 \end{cases}$$

Mouvement dans un champ électrique vertical

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \frac{q \times E}{m} \\ a_z = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{primitive}} \vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = \frac{q \times E}{m} \times t + C_y \\ v_z = C_z \end{cases}$$

Utilisation des coordonnées de \vec{v}_0 :



$$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = v_0 \times \cos \alpha = C_x \\ v_{y_0} = v_0 \times \sin \alpha = \frac{q \times E}{m} \times 0 + C_y \\ v_{z_0} = 0 = C_z \end{cases}$$

Il vient :

$$\begin{cases} C_x = v_0 \times \cos \alpha \\ C_y = v_0 \times \sin \alpha \\ C_z = 0 \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse sont donc :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos \alpha \\ v_y = \frac{q \times E}{m} \times t + v_0 \times \sin \alpha \\ v_z = 0 \end{cases}$$

Au cours du mouvement, la coordonnée v_z est constamment nulle.
Le mouvement du système est donc dans le plan contenant le vecteur vitesse initiale \vec{v}_0 .

INFO

Rappel des conventions d'écriture

- Fonctions dépendant du temps

$$\vec{v}(t) = \vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt}; a_y(t) = a_y = \frac{dv_y}{dt}, \text{ etc.}$$

- Grandeurs à une date t_i donnée

$$\vec{v}(t_i) = \vec{v}_i = \left(\frac{d\vec{OM}}{dt} \right)_{t_i},$$

$$a_y(t_i) = a_{yi} = \left(\frac{dv_y}{dt} \right)_{t_i}, \text{ etc.}$$

c. Détermination du vecteur position

• Puisque le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport au temps, les coordonnées du vecteur position sont obtenues en recherchant les **primitives par rapport au temps** des coordonnées du vecteur vitesse.

• Les **constantes d'intégration** apparues dans les primitives sont déterminées à l'aide des **conditions initiales** : les coordonnées du vecteur position à l'instant initial.

Mouvement dans un champ de pesanteur

Coordonnées du vecteur vitesse

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos \alpha \\ v_y = -g \times t + v_0 \times \sin \alpha \\ v_z = 0 \end{cases}$$

$$\vec{v} \xrightarrow{\text{primitive}} \vec{OM} \begin{cases} x = v_0 \times \cos \alpha \times t + D_x \\ y = -\frac{1}{2} g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t + D_y \\ z = D_z \end{cases}$$

On considère que le point M matérialisant le système est confondu avec l'origine O du repère à la date $t = 0$ s.

Utilisation des coordonnées de \vec{OM}_0 :

$$\vec{OM}_0 \begin{cases} x_0 = 0 = v_0 \times \cos \alpha \times 0 + D_x \\ y_0 = 0 = -\frac{1}{2} g \times 0^2 + v_0 \times \sin \alpha \times 0 + D_y \\ z_0 = 0 = D_z \end{cases}$$

$$\text{Il vient : } \begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = 0 \\ D_z = 0 \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur position sont :

$$\vec{OM} \begin{cases} x = v_0 \times \cos \alpha \times t \\ y = -\frac{1}{2} g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t \\ z = 0 \end{cases}$$

Mouvement dans un champ électrique vertical

Coordonnées du vecteur vitesse

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos \alpha \\ v_y = \frac{q \times E}{m} \times t + v_0 \times \sin \alpha \\ v_z = 0 \end{cases}$$

$$\vec{v} \xrightarrow{\text{primitive}} \vec{OM} \begin{cases} x = v_0 \times \cos \alpha \times t + D_x \\ y = \frac{q \times E}{2m} \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t + D_y \\ z = D_z \end{cases}$$

On considère que le point M matérialisant le système est confondu avec l'origine O du repère à la date $t = 0$ s.

Utilisation des coordonnées de \vec{OM}_0 :

$$\vec{OM}_0 \begin{cases} x_0 = 0 = v_0 \times \cos \alpha \times 0 + D_x \\ y_0 = 0 = \frac{q \times E}{2m} \times 0^2 + v_0 \times \sin \alpha \times 0 + D_y \\ z_0 = 0 = D_z \end{cases}$$

$$\text{Il vient : } \begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = 0 \\ D_z = 0 \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur position sont :

$$\vec{OM} \begin{cases} x = v_0 \times \cos \alpha \times t \\ y = \frac{q \times E}{2m} \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t \\ z = 0 \end{cases}$$

z est constamment nulle, ce qui confirme la **planéité** de la trajectoire contenue ici dans le plan (Oxy) . Par la suite, on limite l'étude des mouvements dans un champ de pesanteur \vec{g} uniforme ou un champ électrique \vec{E} uniforme à une étude dans un repère à deux dimensions.

d. Détermination de l'équation de la trajectoire

L'équation de la trajectoire d'un système est la **relation mathématique entre ses coordonnées spatiales**. Dans un repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$, elle est obtenue en combinant les équations horaires $x = f(t)$ et $y = g(t)$ de façon à « éliminer » la variable temps des équations.

Mouvement dans un champ de pesanteur

On extrait t de l'expression de $x = f(t)$:

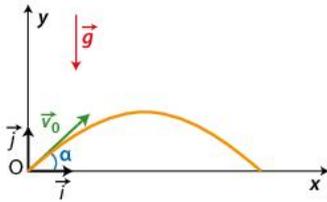
$$t = \frac{x}{v_0 \times \cos \alpha}$$

On remplace t dans l'expression de $y = g(t)$:

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

La trajectoire du système est donc :

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



Trajectoire du système partant de la position O dans un champ de pesanteur uniforme \vec{g}

Mouvement dans un champ électrique vertical

On extrait t de l'expression de $x = f(t)$:

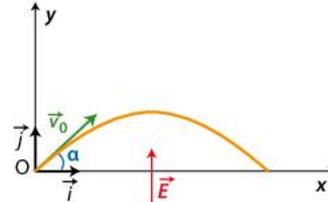
$$t = \frac{x}{v_0 \times \cos \alpha}$$

On remplace t dans l'expression de $y = g(t)$:

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

La trajectoire du système est donc :

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



Trajectoire du système de charge $q < 0$ partant de la position O dans un champ électrique uniforme \vec{E}

INFO

Dans le cas du champ électrique, la concavité de la parabole dépend du signe de la charge électrique q du système et de l'orientation du champ électrique.

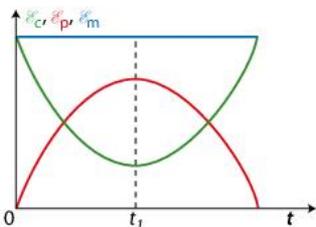
La trajectoire du système est une portion de parabole, dans le **plan vertical** contenant \vec{v}_0 . Elle dépend des **conditions initiales** (vitesse initiale \vec{v}_0 et position initiale \overline{OM}_0).

e. Aspects énergétiques

Le poids et la force électrique sont des forces conservatives.

Lors du mouvement d'un système dans un champ de pesanteur ou électrique uniforme, en l'absence de forces non conservatives, **l'énergie mécanique du système se conserve**. Son énergie cinétique est totalement convertie en énergie potentielle, et inversement.

D Énergies du système lors d'un mouvement de chute libre



Exemple : Pour un mouvement de chute libre dans un champ de pesanteur uniforme, on peut tracer les énergies du système en fonction du temps (graphique D). Ces courbes s'interprètent par :

- une conversion totale d'énergie cinétique \mathcal{E}_c en énergie potentielle de pesanteur \mathcal{E}_p (pour $0 \leq t < t_1$) ;
- puis une conversion totale d'énergie potentielle de pesanteur \mathcal{E}_p en énergie cinétique \mathcal{E}_c (pour $t > t_1$).

L'énergie mécanique \mathcal{E}_m du système reste constante au cours du temps.

Le **théorème de l'énergie cinétique** (ou la conservation de l'énergie mécanique du système) permet de calculer des valeurs de vitesse ou la coordonnée verticale du système selon les données disponibles.



▶ **VIDÉO DE COURS**
Mouvement dans un champ uniforme
▶ **QCM**
Version interactive

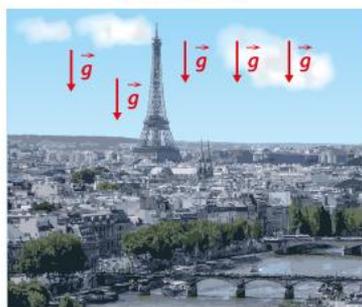
1 Des champs uniformes

Un champ vectoriel uniforme est un champ qui garde en tout point d'une région de l'espace :

- la **même direction** ;
- le **même sens** ;
- la **même valeur**.

Champ de pesanteur

Sur une région de l'espace de **faibles dimensions par rapport à la Terre**, le champ de pesanteur peut être considéré comme **uniforme**.

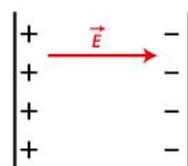


Champ électrique

Le champ électrique entre les plaques d'un condensateur plan chargé est **uniforme**.

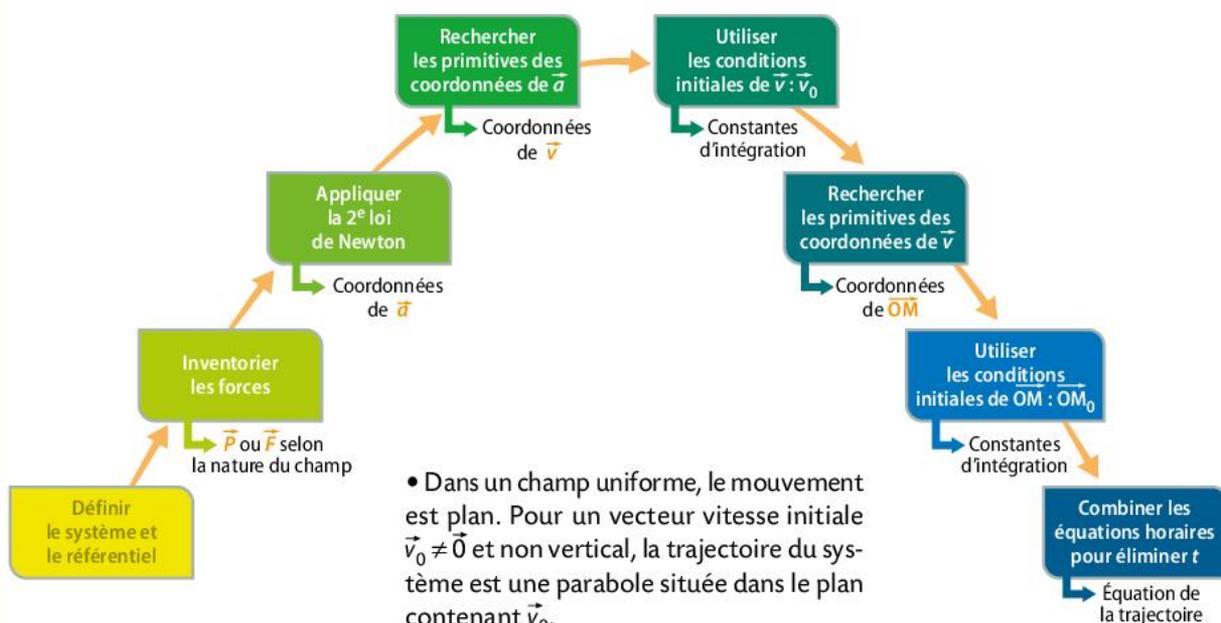
Direction : perpendiculaire aux plaques
Sens : de la plaque chargée positivement vers la plaque chargée négativement
 \vec{E}

Valeur : d'autant plus élevée que la tension est grande et que la distance entre les plaques est faible



2 Le mouvement dans un champ uniforme

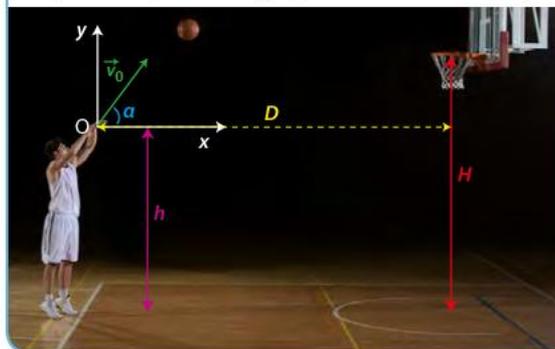
Méthode d'étude du mouvement d'un système dans un champ uniforme



QCM

A

Un ballon de basket est lancé avec la vitesse initiale \vec{v}_0 contenue dans le plan (Oxy). On néglige toute autre force que le poids \vec{P} du ballon.



$$v_0 = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\alpha = 40^\circ$$

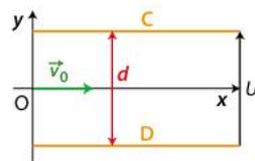
$$h = 2,2 \text{ m}$$

$$D = 4,6 \text{ m}$$

$$H = 3,05 \text{ m}$$

B

Un proton de charge $q = +e$ entre, avec une vitesse initiale \vec{v}_0 , entre les plaques C et D d'un condensateur plan où règne un champ électrique \vec{E} .



Donnée

Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s), puis vérifier la correction p. 147.

A	B	C
----------	----------	----------

1 Des champs uniformes

Si erreur, revoir § 1 p. 30

1. Dans la situation A, le vecteur champ de pesanteur est :	horizontal.	vertical vers le haut.	vertical vers le bas.
2. Le champ de pesanteur est uniforme à l'échelle :	d'un terrain de basket.	d'un continent.	de la Terre.
3. Dans un condensateur plan, le champ électrique est :	uniforme.	perpendiculaire aux plaques.	orienté de la plaque positive vers la plaque négative.

2 Le mouvement dans un champ uniforme

Si erreur, revoir § 2 p. 30

4. Dans la situation A, le vecteur accélération \vec{a}_G du centre de masse du ballon est :	horizontal.	vertical vers le haut.	vertical vers le bas.
5. Dans la situation A, à la date $t = 0 \text{ s}$, la coordonnée horizontale du vecteur vitesse est :	$v_{x_0} = v_0$	$v_{x_0} = v_0 \times \sin \alpha$	$v_{x_0} = v_0 \times \cos \alpha$
6. Dans la situation A, $v_x = v_0 \times \cos \alpha$. Le mouvement horizontal du ballon est :	ralenti.	uniforme.	accélééré.
7. Dans la situation A, $y = -\frac{g}{2(v_0 \times \cos \alpha)^2} \times x^2 + \tan \alpha \times x.$ Quand le centre de masse G du ballon a parcouru la distance horizontale D :	$y = 2,1 \text{ m}$	$y = -4,3 \text{ m}$	$y = -0,1 \text{ m}$
8. Dans la situation B, si la plaque C est chargée négativement et D positivement, le proton est :	dévié vers le bas.	dévié vers le haut.	accélééré sans être dévié.

QCM version interactive

Les bons réflexes

Réflexe 1

Dans tous les cas, une étude de mouvement débute par la définition du système et du référentiel, et par l'inventaire des forces exercées sur le système.

Si l'énoncé demande de...

Il est nécessaire de...

Établir les équations horaires du mouvement.

Réflexe 2

Ex. 6 p. 39

- Écrire la deuxième loi de Newton pour exprimer l'accélération du système.
- Exprimer, dans le repère choisi, les coordonnées du vecteur accélération du système.
- Déterminer les coordonnées du vecteur vitesse du système en recherchant les primitives qui tiennent compte des conditions initiales sur la vitesse.
- Déterminer les coordonnées du vecteur position du système en recherchant les primitives qui tiennent compte des conditions initiales sur la position.

Établir l'équation de la trajectoire.

Réflexe 3

Ex. 10 p. 39

- Extraire le temps t de l'équation horaire ayant la forme mathématique la plus simple.
- Remplacer l'expression de t établie précédemment dans l'autre équation horaire.

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

Réflexe 4

ou

Ex. 14 p. 40

- S'assurer que le travail des forces non conservatives est nul.
- Exploiter la conservation de l'énergie mécanique entre une position initiale et une position finale pour déterminer la grandeur recherchée.
- Énoncer le théorème de l'énergie cinétique dans le référentiel choisi entre une position initiale et une position finale du mouvement du système étudié.
- Exploiter le théorème pour déterminer la grandeur recherchée.

1 Exercice résolu

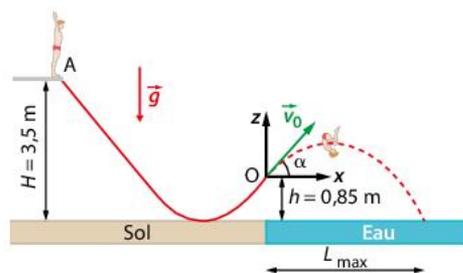
Le water jump

Exploiter des informations ; effectuer des calculs ; interpréter des formules.

Le water jump est une activité au cours de laquelle une personne glisse sur un toboggan mouillé qui se termine par un tremplin. À la sortie du tremplin, elle effectue un saut en chute libre et termine sa course dans l'eau.

Le sol horizontal est choisi comme origine de l'énergie potentielle de pesanteur. La personne est modélisée par son centre de masse G . L'étude de son mouvement est effectuée dans un référentiel terrestre supposé galiléen. On considère que l'action de l'air et les frottements sont négligeables. L'action du toboggan est alors constamment perpendiculaire au vecteur déplacement.

1. La personne part depuis la position A sans vitesse initiale. En utilisant la conservation de l'énergie mécanique, établir l'expression, puis calculer la valeur de sa vitesse en O .
2. On choisit comme origine des dates l'instant où la personne se trouve en O . Établir les équations horaires du mouvement dans le repère (Oxz) .
3. Établir l'équation de la trajectoire du centre de masse de la personne.



Données

- Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- Masse de la personne : $m = 73 \text{ kg}$.

Solution rédigée

- On utilise le Réflexe 1.

Définition du système et du référentiel, et inventaire des forces

- On utilise le Réflexe 4.

Vérification du travail des forces non conservatives

1. Le mouvement du système {personne} est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen. Le système est soumis à son poids et à l'action du toboggan.

Le poids est une force conservative. L'action du toboggan ne travaille pas, car elle est constamment perpendiculaire au vecteur déplacement. Entre les positions A et O , il y a donc conservation de l'énergie mécanique :

$$\Delta \mathcal{E}_{m_{A \rightarrow O}} = \mathcal{E}_{m_O} - \mathcal{E}_{m_A} = 0 \text{ J},$$

soit $\mathcal{E}_{m_O} = \mathcal{E}_{m_A}$ où $\mathcal{E}_{m_O} = \mathcal{E}_{p_O} + \mathcal{E}_{c_O}$.

Exploitation de la conservation de l'énergie mécanique entre A et O

On cherche v_O , les autres grandeurs étant connues :

$$\mathcal{E}_{mO} = m \times g \times h + \frac{1}{2} m \times v_O^2 \text{ et } \mathcal{E}_{mA} = m \times g \times H \text{ car } v_A = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\text{Il vient : } m \times g \times h + \frac{1}{2} m \times v_O^2 = m \times g \times H \text{ puis } v_O = \sqrt{2g \times (H - h)}.$$

$$v_O = \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times (3,5 \text{ m} - 0,85 \text{ m})} = 7,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

On utilise le Réflexe 2.

Utilisation de la deuxième loi de Newton

Expression des coordonnées du vecteur accélération

Recherche de primitives et utilisation des conditions initiales sur la vitesse

Recherche de primitives et utilisation des conditions initiales sur la position

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

Dans le repère choisi, le vecteur accélération a pour coordonnées cartésiennes :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_z = -g \end{cases} \text{ Or } \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ donc } \vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_z = -g \times t + C_z \end{cases} \text{ de plus } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x0} = v_0 \times \cos \alpha \\ v_{z0} = v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

$$\text{Par identification } \begin{cases} C_x = v_0 \times \cos \alpha \\ C_z = v_0 \times \sin \alpha \end{cases} \text{ d'où } \vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \times \cos \alpha \\ v_z = -g \times t + v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

$$\text{Or } \vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt} \text{ donc } \vec{OG} \begin{cases} x = v_0 \times \cos \alpha \times t + D_x \\ z = -\frac{1}{2} g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t + D_z \end{cases} \text{ de plus } \vec{OG}_0 = \begin{cases} x_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases}$$

$$\text{Par identification } \begin{cases} D_x = 0 \\ D_z = 0 \end{cases} \text{ d'où } \vec{OG} \begin{cases} x = v_0 \times \cos \alpha \times t \\ z = -\frac{1}{2} g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t \end{cases}$$

On utilise le Réflexe 3.

Extraction de t de la plus simple équation horaire

Remplacement de t dans l'autre équation horaire

$$3. \text{ On a } x = v_0 \times \cos \alpha \times t \text{ donc } t = \frac{x}{v_0 \times \cos \alpha}.$$

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

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

$z(x)$ est de la forme $z(x) = Ax^2 + Bx + C$: le mouvement est parabolique.

Côté maths 2 : Déterminer la primitive d'une fonction

Côté maths

On considère la fonction f définie pour tout x par $f(x) = 5$.

1. Déterminer la fonction F_1 , primitive de la fonction f , qui vérifie $F_1(0) = 2$.

2. Déterminer la fonction F_2 , primitive de la fonction F_1 , qui vérifie $F_2(0) = 0$.

Méthode

1. On recherche les fonctions F_1 telles que $F_1'(x) = 5$. Les fonctions de la forme $F_1(x) = 5x + B$ le vérifient. Comme $F_1(0) = 2$, il vient : $F_1(0) = 5 \times 0 + B = 2$, donc $B = 2$. La fonction F_1 est définie par : $F_1(x) = 5x + 2$.

2. On recherche les fonctions F_2 telles que $F_2'(x) = 5x + 2$. Les fonctions de la forme $F_2(x) = 2,5x^2 + 2x + C$ le vérifient. Comme $F_2(0) = 0$, il vient : $F_2(0) = 2,5 \times 0^2 + 2 \times 0 + C = 0$, donc $C = 0$.

La fonction F_2 est définie par : $F_2(x) = 2,5x^2 + 2x$.

Côté physique & chimie

La coordonnée a_z de l'accélération d'une balle lâchée sans vitesse initiale est $-10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

À l'instant initial, la balle est située en une position de coordonnée $z = 2,0 \text{ m}$.

1. Exprimer la coordonnée v_z du vecteur vitesse de cette balle.

2. Exprimer la coordonnée z de son vecteur position.



Méthode

1. La coordonnée v_z de la vitesse est la primitive de celle de l'accélération par rapport au temps : $v_z = -10t + C_1$. Comme à $t_0 = 0 \text{ s}$, $v_z(0) = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, il vient : $v_z(0) = -10 \times 0 + C_1 = 0$, donc $C_1 = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La coordonnée v_z a pour expression : $v_z = -10t \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$.

2. La coordonnée z du vecteur position est la primitive de celle de la vitesse par rapport au temps : $z = -5t^2 + C_2$.

Comme à $t_0 = 0 \text{ s}$, $z(0) = 2,0 \text{ m}$, il vient : $z(0) = -5 \times 0^2 + C_2 = 2,0 \text{ m}$, donc $C_2 = 2,0 \text{ m}$.

La coordonnée z a pour expression : $z = -5t^2 + 2,0 \text{ (m)}$.

À retenir !

Soit F et f deux fonctions définies sur un intervalle I .

La fonction F est une primitive de f sur I si : $\forall x \in I, F'(x) = f(x)$.

Parcours d'exercices CORRIGÉS

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan.
- Établir et exploiter les équations horaires du mouvement.
- Établir l'équation de la trajectoire.
- Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans un champ uniforme.
- Capacité mathématique : déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.

Appliquer le cours

4

S'entraîner

18

Vers le BAC

12

17

22 23

10

16

22 23

14

21

22 23

17

22 23

1 Des champs uniformes

2 Reconnaître un champ vectoriel uniforme (1)

Exploiter des informations.

Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques de trois champs vectoriels en fonction de leur position dans l'espace.

	Champ 1	Champ 2	Champ 3
Direction	Constante	Variable	Constante
Sens	Constant	Variable	Constant
Valeur	Variable	Constante	Constante

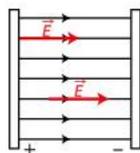
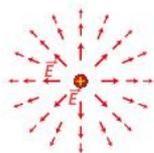
- Lequel est un champ vectoriel uniforme ?

3 Reconnaître un champ vectoriel uniforme (2)

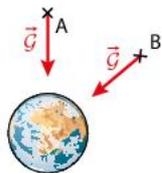
Mobiliser et organiser ses connaissances.

Voici la cartographie de quatre champs vectoriels.

- a) Champ électrique dû à une charge ponctuelle b) Champ électrique entre les armatures d'un condensateur plan



- c) Champ gravitationnel terrestre d) Champ de pesanteur terrestre dans l'espace de la photographie



- Identifier le(s) champ(s) uniforme(s).

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

Effectuer des calculs.

Entre les plaques A et B d'un condensateur plan reliées à un générateur de tension continue, règne un champ électrique uniforme de valeur $E = 1,0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$. Les plaques sont distantes de $d = 10,0 \text{ cm}$.

- Calculer la valeur absolue $|U_{AB}|$ de la tension appliquée entre les plaques.
- Comment varie la valeur du champ électrique si la distance entre les plaques augmente ?

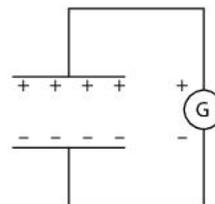
Donnée

Valeur du champ électrique \vec{E} : $E = \frac{|U_{AB}|}{d}$.

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

Construire des vecteurs.

On a représenté ci-dessous les armatures d'un condensateur plan reliées aux bornes d'une source de tension continue. Les plaques sont distantes de $d = 20,0 \text{ cm}$ et la source impose une tension U de 10 kV.



- Déterminer les caractéristiques (direction, sens et valeur) du champ électrique \vec{E} qui règne entre les plaques.
- Représenter le vecteur \vec{E} en différentes positions entre les armatures, sans souci d'échelle mais avec cohérence.

Donnée

Valeur du champ électrique \vec{E} : $E = \frac{|U|}{d}$.

2 Le mouvement dans un champ uniforme

VIDÉO DE COURS Mouvement dans un champ uniforme
QR Code p. 34

6 Exprimer le vecteur accélération (1)

Mobiliser et organiser ses connaissances.

On étudie le mouvement de chute libre du centre de masse d'une bille dans un référentiel terrestre supposé galiléen auquel on associe le repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$.

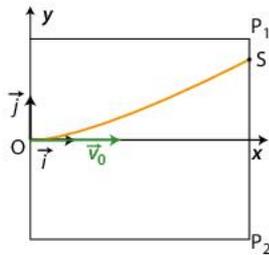
- À l'aide de la deuxième loi de Newton, exprimer le vecteur accélération du centre de masse de la bille.
- Déterminer ses coordonnées cartésiennes.

Utiliser le réflexe 2

7 Exprimer le vecteur accélération (2)

Exploiter un schéma.

Un positon, particule de charge e et de masse m , pénètre dans un champ électrique uniforme créé par un condensateur plan. Le mouvement du positon, qui n'est soumis qu'à la seule force électrique F , est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

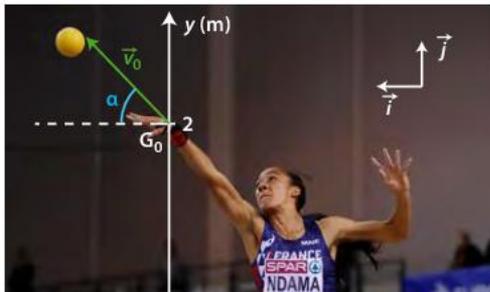


- Représenter sur le schéma le vecteur champ électrique pour que le positon suive la trajectoire orange.
- En appliquant la deuxième loi de Newton, exprimer le vecteur accélération du positon assimilé à un corps ponctuel et déterminer ses coordonnées cartésiennes.

8 Exprimer les conditions initiales

Exploiter des informations.

Une athlète lance un poids, assimilé à un point matériel, dans un champ de pesanteur uniforme. On représente ci-dessous la situation du lancer à la date $t = 0$ s.



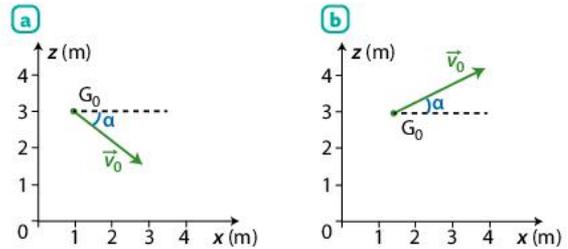
- Dans quel référentiel le mouvement du poids est-il étudié ?
- Exprimer les coordonnées cartésiennes du vecteur position initiale \vec{OG}_0 et celles du vecteur vitesse initiale \vec{v}_0 du poids.

9 Identifier les conditions initiales

Exploiter des informations.

Parmi les deux schémas proposés ci-dessous, lequel traduit les conditions initiales suivantes :

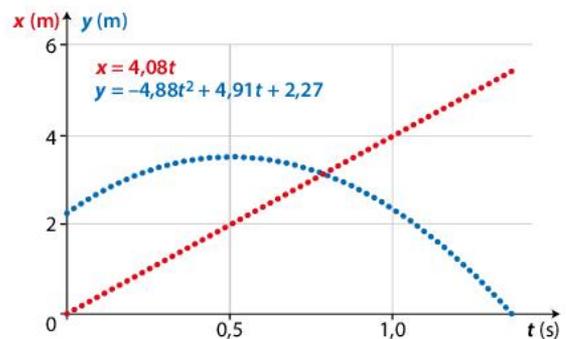
$$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x0} = v_0 \times \cos \alpha \\ v_{z0} = -v_0 \times \sin \alpha \end{cases} \text{ et } \vec{OG}_0 \begin{cases} x_0 = 1 \text{ m} \\ z_0 = 3 \text{ m} \end{cases}$$



10 Établir l'équation de la trajectoire

Effectuer des calculs.

Le graphique ci-dessous représente l'abscisse x et l'ordonnée y du centre de masse G d'une bille au cours du temps. Les équations horaires sont précisées sur le graphique.



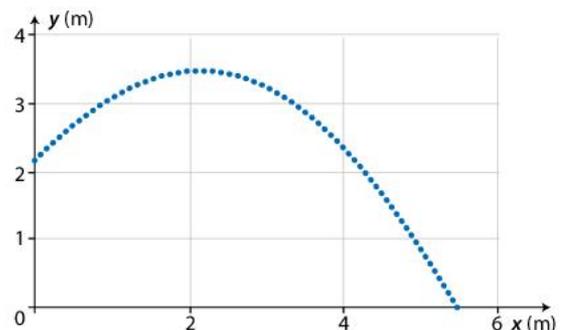
- Établir l'équation cartésienne de la trajectoire de G .

Utiliser le réflexe 3

11 Identifier l'équation d'une trajectoire

Faire preuve d'esprit critique.

- Choisir l'équation de la trajectoire de la bille étudiée ci-dessous, avec x et y en mètre, et t en seconde.



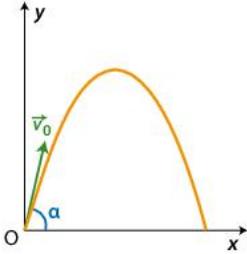
- a) $y = -0,304x^2 + 1,26x$ b) $y = -0,304x^2 + 1,26x + 2,21$
c) $y = -0,304t^2 + 1,26t + 2,21$

12 Établir les équations horaires (1)

CORRIGÉ Mobiliser et organiser ses connaissances.

Au cours d'un match de rugby, un joueur réalise une chandelle.

On se place dans un référentiel terrestre supposé galiléen. On néglige toutes les actions dues à l'air.



À l'instant $t = 0$ s :

- le ballon, assimilé à un point matériel, est à l'origine du repère ;
- le vecteur vitesse initiale du ballon fait un angle α avec l'axe horizontal Ox .

Le graphique ci-dessus représente la trajectoire du ballon dans le repère choisi.

Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération du ballon, exprimées en $m \cdot s^{-2}$, sont :

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

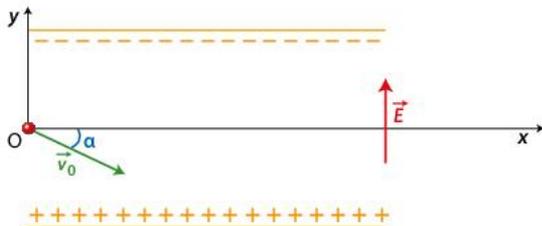
1. Établir les coordonnées du vecteur vitesse \vec{v} du ballon.
2. Montrer que les équations horaires du mouvement sont :

$$x = v_0 \times \cos \alpha \times t \text{ et } y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t.$$

13 Établir les équations horaires (2)

CORRIGÉ Mobiliser et organiser ses connaissances.

Un positon, particule de charge e et de masse m , pénètre, à $t = 0$ s, dans un champ électrique uniforme avec une vitesse initiale \vec{v}_0 . On assimile le positon à un corps ponctuel G soumis uniquement à la force électrique, et on étudie son mouvement dans un référentiel terrestre supposé galiléen.



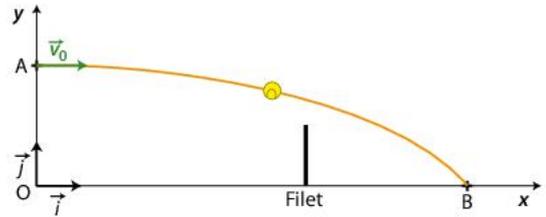
1. Exprimer les coordonnées cartésiennes du vecteur position \vec{OG}_0 et celles du vecteur vitesse \vec{v}_0 à $t = 0$ s.
2. Utiliser la deuxième loi de Newton pour exprimer le vecteur accélération \vec{a} du positon.
3. En déduire les coordonnées cartésiennes des vecteurs accélération, vitesse et position du positon.

14 Appliquer la conservation de l'énergie (1)

CORRIGÉ Effectuer des calculs.

Pour servir au tennis, un joueur placé en O lance une balle verticalement et la frappe en A à une hauteur $H = 2,7$ m au-dessus du sol.

La balle part avec une vitesse horizontale de valeur $v_0 = 126 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ dans un référentiel terrestre supposé galiléen. De masse m , elle n'est soumise qu'à son poids.



1. Justifier que l'énergie mécanique de la balle se conserve.
2. Montrer que l'expression de la valeur v_B de la vitesse de la balle lorsqu'elle touche le sol s'écrit :

$$v_B = \sqrt{v_0^2 + 2g \times H}$$
3. Calculer cette valeur.

Utiliser le réflexe 4

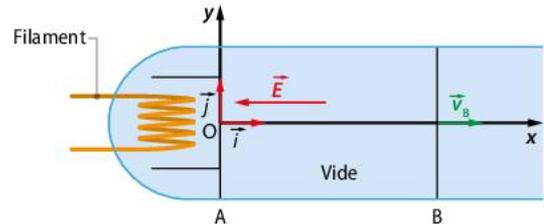
Donnée

Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

15 Appliquer le théorème de l'énergie cinétique

CORRIGÉ Effectuer des calculs.

Le filament d'un canon à électrons émet des électrons avec une vitesse initiale de valeur négligeable. Ils sont ensuite accélérés à l'intérieur d'un condensateur plan dont les armatures A et B sont verticales. On néglige le poids de l'électron devant la force électrique. Le référentiel d'étude est supposé galiléen.



- Montrer, en appliquant le théorème de l'énergie cinétique, que l'expression de la valeur v_B de la vitesse en B est
$$v_B = \sqrt{\frac{-2e \times U_{AB}}{m_e}}$$
.

Donnée

Travail de la force électrique lors du déplacement d'une particule de charge q entre les positions A et B : $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = q \times U_{AB}$.

16 Connaître les critères de réussite

Service au tennis

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs ; interpréter des résultats.

À l'instant $t = 0$ s, Ashleigh BARTY frappe une balle de tennis à une hauteur $h = 2,80$ m.

Elle donne à cette balle une vitesse initiale \vec{v}_0 orientée vers le bas, qui fait un angle α égal à $6,0^\circ$ avec l'horizontale.

Le mouvement du centre de masse B de la balle de tennis est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen auquel on associe le repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$. Dans l'étude qui suit, on suppose que la balle est frappée sans effet et que toutes les actions dues à l'air sont négligées.



- Schématiser la situation.
- Établir l'expression du vecteur accélération \vec{a} du centre de masse B de la balle.
- Montrer que les équations horaires du mouvement de ce centre de masse B sont :

$$x = v_0 \times \cos \alpha \times t$$

et

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

- Montrer que l'équation de la trajectoire du point B s'écrit :

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

- La balle passe-t-elle au-dessus du filet ?

Données

- Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- Distance ligne de fond de court-filet : $L = 11,90$ m.
- Hauteur du filet : $H = 0,92$ m.
- Valeur de la vitesse initiale : $v_0 = 47,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Critères de réussite



Rigueur dans les calculs

- J'ai respecté les notations des vecteurs (avec des flèches) et des coordonnées (sans flèche).
- J'ai vérifié l'homogénéité des expressions littérales.

Justification des réponses

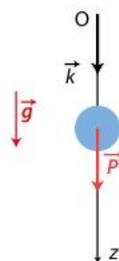
- J'ai justifié mon choix à la question 5.
- J'ai rédigé les réponses.

Côté maths

→ Côté maths 2, p. 37

17 Déterminer des primitives

Une bille de masse $m = 3,00 \times 10^{-2}$ g est lâchée sans vitesse initiale. Son mouvement de chute libre est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen. À l'instant initial, la bille est à l'origine du repère.



- Appliquer la deuxième loi de Newton pour montrer que l'accélération de la bille a pour coordonnée $a_z = g$.
- Déterminer la coordonnée cartésienne v_z du vecteur vitesse de la bille.
- Déterminer la coordonnée cartésienne z du vecteur position de la bille.

18 Python

Trajectoire d'une particule chargée

Utiliser un langage de programmation.

Une particule de charge q arrive, à l'instant $t = 0$ s, en une position O dans un champ électrique \vec{E} uniforme. Elle pénètre dans ce champ avec une vitesse initiale \vec{v}_0 faisant un angle α avec l'horizontale.

La particule, qui peut être un électron, un positon ou un proton, est supposée ponctuelle. Elle est soumise à la seule force électrique \vec{F} . Son mouvement est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

La valeur du champ électrique peut varier de $1,0 \times 10^4$ à $3,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. La valeur de la vitesse initiale peut varier de $1,0 \times 10^7$ à $3,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'angle α est compris entre -90 et 90° .

Un programme en langage python, à utiliser, permet de tracer la trajectoire d'une particule entre les plaques d'un condensateur plan chargé.

▶ PROGRAMME Python – Lien p. 34

- Dans un condensateur plan, quelles grandeurs faut-il modifier pour faire varier la valeur du champ électrique ?
- Comment la trajectoire d'un électron évolue-t-elle, pour $\alpha = 0^\circ$, lorsque la valeur :
 - de la vitesse initiale augmente ?
 - du champ électrique diminue ?
- Quelle est l'influence du signe de la charge sur la trajectoire d'une particule ?
- Ces observations sont-elles en accord avec l'équation de la trajectoire d'une particule :

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

- Quel doit être l'angle α pour qu'un proton de vitesse initiale $v_0 = 2,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ placé dans un champ électrique de valeur $E = 2,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ atteigne la plaque supérieure ?

Données

- Charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C.
- Pour le positon : $m_{po} = 9,1 \times 10^{-31}$ kg ; $q_{po} = +e$.
- Pour l'électron : $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg ; $q_e = -e$.
- Pour le proton : $m_{pr} = 1,7 \times 10^{-27}$ kg ; $q_{pr} = +e$.

19  Penalty in rugby

| Pratiquer une langue vivante étrangère.

A rugby player attempts a penalty from 38 metres in front of the posts. We are interested in the movement of the center of mass G of the ball. Air friction on the ball is neglected.



At time $t = 0$ s, he gives the ball a speed v_0 of $21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ with an angle $\alpha = 55^\circ$ to the horizontal axis.

1. Determine the coordinates of the acceleration, velocity and position vectors of G.
2. Establish the equation of the ball's trajectory.
3. Does the ball pass over the cross-bar at height $h = 3.0$ metres over the ground?

Data

$g = 9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

20 À chacun son rythme

L'expérience de J. J. THOMSON

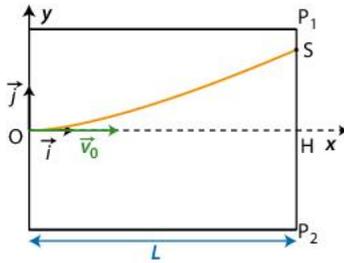
| Mobiliser et organiser ses connaissances ; rédiger une explication.

Commencer par résoudre l'énoncé compact. En cas de difficultés, passer à l'énoncé détaillé.

Au XIX^e siècle, Joseph John THOMSON conçoit un dispositif dans lequel un faisceau d'électrons est dévié lors de son passage entre deux plaques où règne un champ électrique. La mesure de la déviation du faisceau d'électrons lui permet alors de déterminer le rapport $\frac{e}{m_e}$.

À l'instant $t = 0$ s, l'électron arrive en un point O avec une vitesse horizontale \vec{v}_0 .

L'électron, supposé ponctuel, est soumis à la seule force électrique \vec{F} . Son mouvement est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen. La trajectoire de l'électron dans un repère (O,xy) est représentée sur le schéma ci-dessus :



À la sortie de la zone entre les plaques P_1 et P_2 , l'électron a subi une déviation verticale HS comme indiqué ci-dessus.

Énoncé compact

Calculer le rapport $\frac{e}{m_e}$.

Énoncé détaillé

1. Exprimer la force électrique qui s'applique sur l'électron.
2. En utilisant la deuxième loi de Newton, déterminer les équations horaires du mouvement de l'électron.
3. Déterminer l'équation de la trajectoire de l'électron.
4. Calculer le rapport $\frac{e}{m_e}$.

Données

- Longueur des plaques : $L = 9,0 \times 10^{-2} \text{ m}$.
- Valeur de la vitesse initiale de l'électron : $v_0 = 2,4 \times 10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Valeur du champ électrique : $E = 1,6 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.
- Hauteur atteinte par l'électron à la sortie des plaques : $HS = 2,0 \times 10^{-2} \text{ m}$.

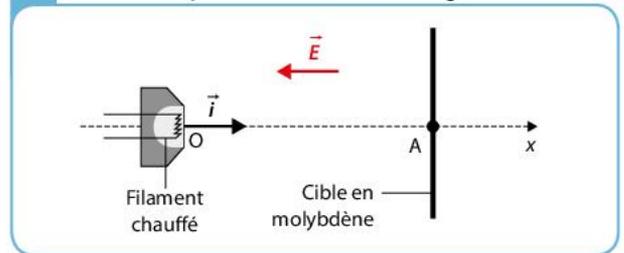
21 Émission de rayons X par collision avec des électrons

| Mobiliser et organiser ses connaissances.

Les rayons X, découverts en 1895 par le physicien allemand Wilhelm Conrad RÖNTGEN, sont produits dans des dispositifs appelés tubes de Coolidge, vidés d'air. Dans ce dispositif, des électrons sont émis par un filament chauffé par effet Joule. Ils sont ensuite accélérés sous l'effet d'un champ électrique uniforme \vec{E} et dirigés vers une cible de molybdène. Ce champ est obtenu grâce à une tension électrique U_{OA} d'environ -50 kV imposée entre le filament chauffé et la cible.

Lorsque les électrons atteignent la cible de molybdène, ils interagissent avec le métal pour produire les rayons X.

A Schéma simplifié d'un tube de Coolidge



On cherche la valeur de la vitesse atteinte par les électrons lorsqu'ils arrivent sur la cible en molybdène.

On suppose pour cela qu'un électron est émis en O avec une vitesse nulle à $t = 0$ s. Il arrive en A avec une vitesse \vec{v}_A .

1. a. Donner l'expression de la force électrique \vec{F} subie par cet électron.
- b. Comparer la direction et le sens de la force électrique \vec{F} à ceux du champ électrique \vec{E} .

2. Montrer que, dans le cas où la tension électrique U_{OA} appliquée entre le filament et la cible est -50 kV , on peut négliger le poids de l'électron devant la force électrique.

3. Montrer que l'expression de la valeur de la vitesse de l'électron lorsqu'il arrive au point A est :

$$v_A = \sqrt{\frac{-2e \times U_{OA}}{m_e}}$$

4. Calculer la valeur de cette vitesse en A.

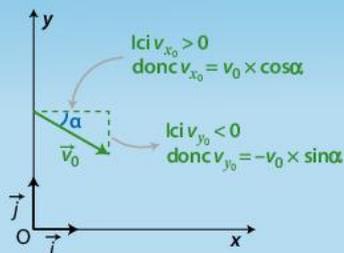
Données

- $OA = L = 2,0 \text{ cm}$.
- Charge électrique élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Travail de la force électrique lors du déplacement d'une particule de charge q entre les positions A et B : $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = q \times U_{AB}$.
- La valeur de \vec{E} est : $E = \frac{|U_{OA}|}{OA}$.

Tenir compte des conditions initiales

- Ne pas oublier les constantes d'intégration lors d'une recherche de primitive.
- Penser à utiliser les conditions initiales pour déterminer ces constantes.

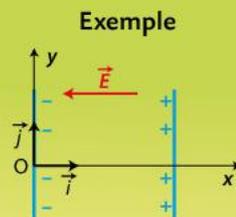
Déterminer les coordonnées du vecteur vitesse initiale



Utiliser correctement la trigonométrie.

Faire attention aux signes

Les coordonnées des vecteurs peuvent être négatives, mais la valeur (norme) d'un vecteur est toujours positive !



$$\vec{E} = E_x \vec{i}$$

$$E_x < 0 \text{ mais } E > 0$$

Ne pas confondre

équation horaire et équation de trajectoire

équation horaire
du type x ou y
ou $z = f(\text{temps})$



équation de trajectoire
du type z
ou $y = g(x)$

Préparation à l'écrit

→ Les bons réflexes 1, 2, 3 et 4 sont présentés p. 36

22 CORRIGÉ 30 min

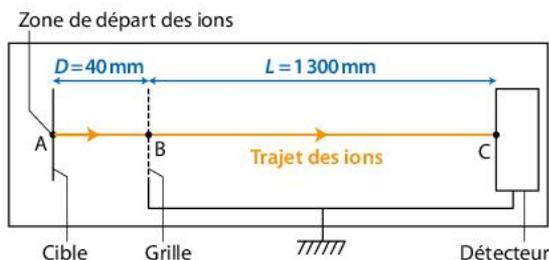
Le spectromètre de masse

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs ; argumenter.

D'après Baccaauréat S, Polynésie 2014

La spectrométrie de masse est une technique de laboratoire d'analyse destructive, qui permet d'identifier et de caractériser une molécule, mais qui exige préalablement de la casser et l'ioniser. Les fragments ionisés ainsi créés, notés F_i^+ , sont alors accélérés entre la cible et la grille. Après la grille, ils arrivent jusqu'au détecteur en traversant une zone dans laquelle ne règne aucun champ électrique. Le poids de chaque fragment ionisé est négligé dans l'étude qui suit.

1. On donne ci-dessous le schéma simplifié d'une partie du spectromètre de masse.



a. Représenter sur ce schéma, sans souci d'échelle, la force électrique \vec{F} qui s'exerce sur un fragment ionisé F_i^+ situé en A pour qu'il soit accéléré de la cible jusqu'à la grille située en B. En déduire la direction et le sens du champ électrique \vec{E} , supposé uniforme, qui règne entre la cible et la grille.

b. Un fragment ionisé F_i^+ de masse m quitte la position A de la cible avec une vitesse de valeur négligeable. On applique entre la cible et la grille, distantes de D , une tension U .

Montrer, par application du théorème de l'énergie cinétique, que la valeur v_B de la vitesse du fragment ionisé F_i^+ en B a pour expression $v_B = \sqrt{\frac{2e \times U}{m}}$.

Utiliser le réflexe 4

c. Calculer la valeur v_B de la vitesse pour une valeur de tension appliquée U égale à 20 kV, sachant que la masse du fragment ionisé est $m = 7,1 \times 10^{-26}$ kg.

2. Montrer que le mouvement du fragment ionisé F_i^+ dans la zone entre la grille et le détecteur est rectiligne uniforme. En déduire l'expression de la durée nécessaire Δt_{BC} pour qu'un fragment parcoure la distance BC.

3. On appelle « temps de vol » (*time of flight*), la durée du parcours du fragment ionisé F_i^+ entre la cible et le détecteur.

a. Appliquer la deuxième loi de Newton pour exprimer la durée mise par le fragment pour se déplacer entre la cible et la grille.

Utiliser le réflexe 2

b. Montrer que le « temps de vol » τ a pour expression :

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

c. Expliquer comment il est possible d'identifier les différents fragments de la molécule dans ce spectromètre de masse.

Données

- Charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C.
- Expression du travail de la force électrique lors du déplacement d'une particule de charge q entre une position A et une position B : $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = q \times U_{AB}$.

23
30 min

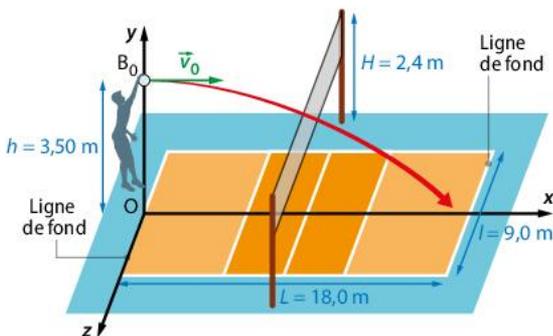
Service et réception au volley

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique et argumenter.

D'après Baccalauréat S, France métropolitaine, 2018

Au volley-ball, le service smashé est le type de service le plus fréquemment pratiqué par les joueurs professionnels : le serveur doit se placer après la limite du terrain, lancer très haut son ballon, effectuer une course d'élan, puis sauter pour le frapper. Après la course d'élan, le serveur saute de façon à frapper le ballon en une position B_0 située à la hauteur h au-dessus de la ligne de fond de terrain.

A Dimensions du terrain de volley-ball et allure de la trajectoire du ballon



Le mouvement du ballon est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen muni du repère $(Oxyz)$, et l'instant de la frappe est choisi comme origine des temps. On étudie le mouvement du centre de masse du ballon sans tenir compte de l'action de l'air.

Partie I Validité du service

Le service est effectué depuis la position B_0 à la vitesse de valeur $v_0 = 21,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le service sera considéré comme valide à condition que le ballon franchisse le filet sans le toucher et qu'il retombe dans le terrain adverse.

1. Exprimer les coordonnées du vecteur accélération du centre de masse du ballon après la frappe.

Utiliser le réflexe 1

2. Montrer que le mouvement du centre de masse du ballon est plan.

3. Établir que les équations horaires du mouvement du centre de masse du ballon s'écrivent :

$$x = v_0 \times t \quad \text{et} \quad y = -\frac{1}{2} g \times t^2 + h$$

Utiliser le réflexe 2

4. En déduire l'équation de la trajectoire.

Utiliser le réflexe 3

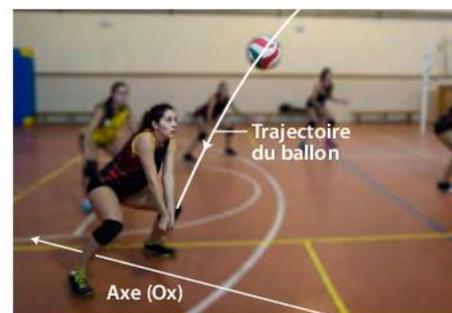
5. En admettant que le ballon franchisse le filet, vérifier qu'il touche le sol avant la ligne de fond.

6. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, exprimer puis calculer la valeur v_{sol} de la vitesse du centre de masse du ballon lorsqu'il touche le sol.

Utiliser le réflexe 4

Partie II Réception du ballon par un joueur adverse

Au moment où le serveur frappe le ballon ($t = 0$ s), un joueur de l'équipe adverse est placé à $1,0$ m de la ligne de fond du terrain. Il débute sa course vers l'avant pour réceptionner le ballon en réalisant une « manchette » comme le montre la photographie ci-après.



Le contact entre le ballon et le joueur se fait en R situé à une hauteur de 80 cm au-dessus du sol.

On admet que les équations horaires du mouvement du ballon établies précédemment restent valables.

• Évaluer la valeur de la vitesse moyenne minimale du déplacement de ce joueur pour qu'il réceptionne le ballon dans la position R. Ce résultat semble-t-il réaliste ?

Coup de pouce QR Code p. 34

Données

- Rayon du ballon de volley-ball : $r = 10$ cm.
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

3

Mouvement dans un champ de gravitation



Thomas PESQUET, à bord de la station spatiale internationale ISS, se déplace autour de la Terre en orbite basse quasi circulaire avec une vitesse de valeur moyenne $7,66 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

- À quelle altitude se trouve l'ISS ?

➤ Rendez-vous : Exercice 11 p. 56

© ESA/NASA

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien. Exercice 4 p. 54
- Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire. Activité 2 p. 47
- Capacité numérique : exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler. Activité 2 p. 47

Activité 1

documentaire

Les satellites artificiels de la Terre

Notions

- Mouvement des satellites et des planètes
- Satellite géostationnaire

Les satellites artificiels lancés par l'Homme autour de la Terre sont dédiés à l'observation, aux télécommunications ou à la recherche. Thomas PESQUET a effectué, entre novembre 2016 et juin 2017, une mission à bord de la station spatiale ISS évoluant à une altitude proche de 410 km. Il a annoncé avoir vu le Soleil se lever 16 fois par 24 heures.



► **Objectif de l'activité :** Quelles sont les principales caractéristiques du mouvement des satellites artificiels ?

A Mouvement d'un satellite

Le mouvement d'un satellite de la Terre est étudié dans le référentiel géocentrique. Sa trajectoire dépend des conditions de son lancement. Le satellite se déplace ensuite de façon périodique sur une trajectoire appelée **orbite**.

Le mouvement d'un satellite est, entre autres, caractérisé par :

- l'inclinaison : angle entre le plan de l'orbite et celui de l'équateur terrestre ;
- la période de révolution : durée d'un tour complet.

Ces grandeurs sont choisies très précisément en fonction de la mission assignée au satellite.

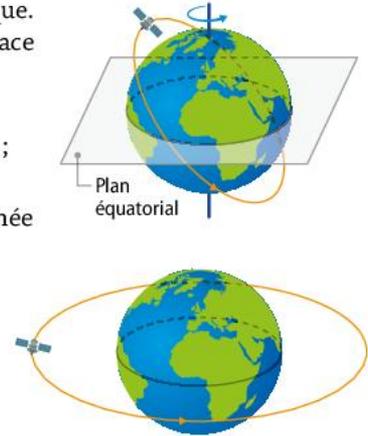
L'orbite polaire

À une altitude généralement assez basse, un satellite en orbite polaire passe au-dessus des pôles à chaque révolution.



L'orbite géostationnaire

Un satellite géostationnaire est immobile pour un observateur terrestre. Sa période de révolution est égale à la période de rotation de la Terre autour de l'axe des pôles : 23 h 56 min.



B Exemples de satellites artificiels de la Terre

Les **satellites Spot** sont une famille de satellites développés dans de nombreux domaines : défense, suivi des intempéries, etc. Ils évoluent à une altitude voisine de 820 km.



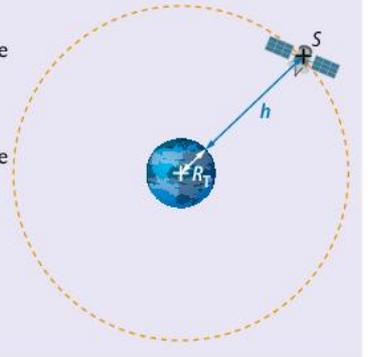
Les **satellites Météosat** forment une constellation de cinq satellites météorologiques. Chaque satellite observe constamment la même zone à la surface de la Terre.



COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

Dans le référentiel géocentrique et dans l'approximation des trajectoires circulaires, la période de révolution des satellites de la Terre situés à une altitude h a pour expression :

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



Données

- Masse de la Terre : $M_T = 5,97 \times 10^{24}$ kg.
- Rayon de la Terre : $R_T = 6,37 \times 10^3$ km.
- Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N · m² · kg⁻².

On se place dans l'hypothèse d'une trajectoire circulaire.

Analyse des documents

Exploiter des informations ANA-RAIS

- Quelle est la nature du mouvement d'un satellite géostationnaire dans le référentiel géocentrique, puis dans un référentiel terrestre ?
 - Montrer que les satellites géostationnaires évoluent à une altitude h voisine de 36 000 km.

Exploiter des informations ANA-RAIS

- Les satellites Spot et Météosat sont-ils géostationnaires ?
 - Vérifier l'affirmation de Thomas PESQUET.

Un pas vers le cours

Rendre compte à l'écrit en utilisant un vocabulaire adapté COM

- Quelles sont les principales caractéristiques du mouvement des satellites artificiels ?

Activité 2

numérique

Les lois de Kepler à l'ère de l'informatique

Notion
Lois de Kepler

En 1705, Edmond HALLEY prévoit, en s'appuyant sur les lois de Kepler et sur les travaux d'Isaac NEWTON, le retour de la célèbre comète qui porte depuis son nom. La comète de Halley met 76 ans pour parcourir son orbite autour du Soleil dont le demi-grand axe mesure 17,9 unités astronomiques.



► **Objectif de l'activité :** Dans quel but exploiter les lois de Kepler ?

A Lois de Kepler

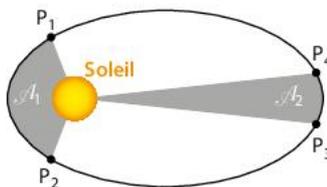
Johannes KEPLER (1571-1630) formule trois lois qui décrivent le mouvement des planètes autour du Soleil.

Première loi de Kepler

Dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire du centre de masse d'une planète est une ellipse dont le centre de masse du Soleil est l'un des foyers.

Deuxième loi de Kepler

Le segment de droite reliant les centres de masse du Soleil et de la planète balaie des aires égales pendant des durées égales.



Troisième loi de Kepler

Le rapport entre le carré de la période de révolution T d'une planète du système solaire et le cube de son demi-grand axe a est constant : $\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$.

B Exploitation des données de l'IMCCE

L'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) a pour mission de calculer la position des astres à intervalles de temps réguliers.

lycee.hachette-education.com/physique-si/tle



Un programme en langage python, fourni en téléchargement, traite les données brutes issues du site de l'IMCCE et permet :

- de tracer la trajectoire des planètes du système solaire dans le référentiel héliocentrique ;
- d'étudier l'évolution de leur vitesse ;
- de déterminer leur période de révolution, etc.

Les données de Mercure, de Vénus, de la Terre et de Mars sont stockées dans des fichiers « .csv » exploitables par le programme.

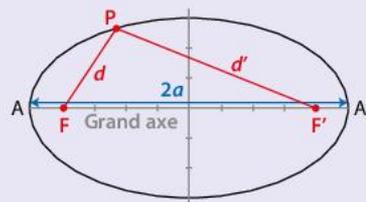
COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

Une ellipse est une courbe plane, définie comme l'ensemble des points P vérifiant :

$$FP + F'P = d + d' = 2a$$

F et F' sont appelés les foyers de l'ellipse.

$[AA']$ est le grand axe de l'ellipse avec $AA' = 2a$.



Remarque : lorsque F et F' sont confondus, l'ellipse devient un cercle de rayon a .

Donnée

Unité astronomique : $1 \text{ ua} = 1,50 \times 10^{11} \text{ m}$.

Simulation numérique

Utiliser un langage de programmation RÉA

- 1 Exécuter le programme « Lois_Kepler » pour chaque planète et constater que leur trajectoire n'est pas rigoureusement circulaire.

Interpréter des résultats VAL

- a. Choisir une planète et vérifier la deuxième loi de Kepler.
- b. À partir de la deuxième loi de Kepler, justifier que les valeurs des vitesses aux positions A et P sont différentes.

Interpréter des résultats VAL

- 2 a. Relever, pour chaque planète, sa période de révolution T et le demi-grand axe a de son orbite.
b. Vérifier la troisième loi de Kepler.

Interpréter des résultats VAL

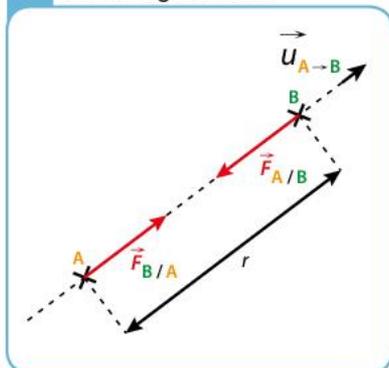
- 3 Justifier que la comète de Halley est en orbite autour du Soleil.

Un pas vers le cours

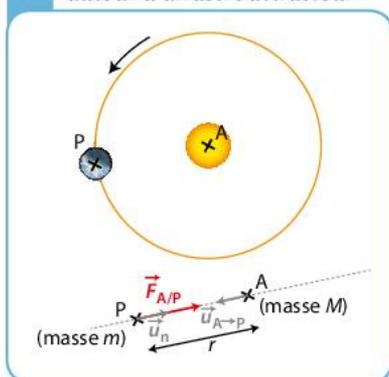
Utiliser un vocabulaire scientifique adapté et rigoureux COM

- 4 Dans quel but exploiter les lois de Kepler ?

A Force de gravitation



B Mouvement d'une planète autour d'un astre attracteur



C Satellite géostationnaire



> L'orbite du satellite géostationnaire est contenue dans le plan de l'équateur. Comme l'altitude du satellite géostationnaire est 35 800 km, la valeur de sa vitesse est $3,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Il est immobile dans un référentiel terrestre.

1 Le mouvement des satellites et des planètes

a. Force et champ de gravitation

La **force de gravitation** exercée par un corps A de masse m_A sur un corps B de masse m_B séparés d'une distance r (schéma A) a pour expression :

$$\vec{F}_{A/B} = -G \times \frac{m_A \times m_B}{r^2} \vec{u}_{A \rightarrow B} \quad \text{avec} \quad \vec{F}_{A/B} = m_B \vec{G}$$

G est la constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$. \vec{G} est le champ de gravitation newtonien dû au corps A en B à la distance r de A :

$$\vec{G} = -G \times \frac{m_A}{r^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$$

b. Mouvement des satellites et des planètes

On s'intéresse au mouvement du centre de masse P d'une planète ou d'un satellite de masse m en orbite considérée circulaire autour d'un astre attracteur A de masse M .

L'étude se fait dans le référentiel astrocentrique considéré comme galiléen, muni du **repère de Frenet** centré sur P (schéma B).

• La planète est soumise à la force de gravitation exercée par l'astre. Dans le repère de Frenet, cette force s'exprime par :

$$\vec{F}_{A/P} = G \times \frac{m \times M}{r^2} \vec{u}_n \quad \text{soit} \quad \vec{F}_{A/P} = m \vec{G}$$

avec \vec{G} le champ de gravitation newtonien dû à l'astre attracteur en P à la distance r de A. À tout instant, $\vec{u}_n = -\vec{u}_{A \rightarrow P}$.

• La deuxième loi de Newton appliquée à la planète, qui n'est soumise qu'à la force de gravitation exercée par l'astre, s'écrit :

$$\Sigma \vec{F} = m \vec{a} \quad \text{soit} \quad m \vec{G} = m \vec{a}$$

$$\text{donc} \quad \vec{G} = \vec{a} \quad \text{d'où} \quad G \times \frac{m \times M}{r^2} \vec{u}_n = m \vec{a}$$

• L'accélération d'une planète ou d'un satellite en orbite autour d'un astre a ainsi pour expression : $\vec{a} = G \times \frac{M}{r^2} \vec{u}_n$.

• Dans le repère de Frenet centré sur P, $\vec{a} = \frac{v^2}{r} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t$.

Comme $\vec{a} = G \times \frac{M}{r^2} \vec{u}_n$, il vient :

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

soit : $v = \text{constante}$

Le mouvement de la planète est uniforme dans le référentiel astrocentrique.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{v^2}{r} = G \times \frac{M}{r^2} \\ \text{soit : } v = \sqrt{\frac{G \times M}{r}} \quad (\text{schéma C}) \end{array} \right\}$$

On retrouve $v = \text{constante}$, car G , M et r sont des constantes.

• Le vecteur vitesse \vec{v} du satellite a donc pour expression :

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{G \times M}{r}} \vec{u}_t$$

L'application de la **deuxième loi de Newton** dans le **repère de Frenet** permet de déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation.



Lois de Kepler

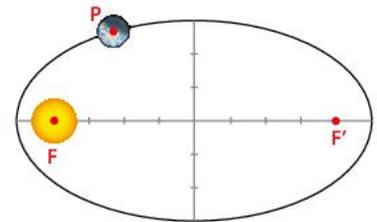
VIDÉO DE COURS

2 Les lois de Kepler

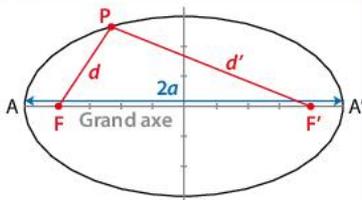
Au début du XVII^e siècle, en utilisant les résultats des observations de Tycho BRAHE (1546-1601), l'astronome Johannes KEPLER (1571-1630) formule trois lois qui décrivent le mouvement des planètes autour du Soleil.

a. Première loi de Kepler : loi des orbites

Dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire du centre de masse d'une planète est une **ellipse** (schéma D) dont le centre de masse du Soleil est l'un des foyers.



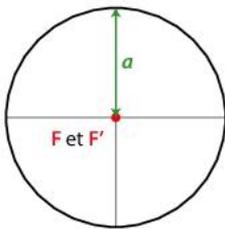
D Ellipses



Une ellipse est une courbe plane, définie comme l'ensemble des points P vérifiant la relation :

$$FP + F'P = d + d' = 2a$$

F et F' sont appelés les foyers de l'ellipse. [AA'] est le grand axe de l'ellipse avec $AA' = 2a$.



Lorsque F et F' sont confondus, l'ellipse devient un cercle de rayon $r = a$.

b. Deuxième loi de Kepler : loi des aires

- Le segment de droite reliant les centres de masse du Soleil et de la planète balaie des **aires égales** pendant des **durées égales** (schéma E).
- La valeur de la vitesse d'une planète le long de sa trajectoire elliptique autour du Soleil **n'est pas constante** ; elle est maximale lorsque la planète est la plus proche du Soleil.

c. Troisième loi de Kepler : loi des périodes

- Pour toutes les planètes du système solaire, le rapport entre le carré de la **période de révolution T** et le cube de la longueur a du **demi-grand axe** est égal à une même constante : $\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$.
- Dans l'approximation des trajectoires circulaires, le demi-grand axe a est égal au **rayon r** de la trajectoire.

La **période de révolution T** d'une planète est la durée qu'elle met pour faire un tour autour du Soleil. Elle s'écrit : $T = \frac{2\pi \times r}{v}$.

En remplaçant v par son expression trouvée page précédente, il vient :

$$T = \frac{2\pi \times r}{\sqrt{\frac{G \times M_s}{r}}}$$

soit :

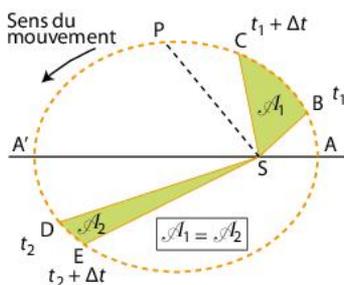
$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{r^3}{G \times M_s}}$$

$$T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_s}$$

On a alors $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_s} = \text{constante}$, car G et M_s sont constantes.

Cette expression constitue la **troisième loi de Kepler** dans le cas d'un mouvement **circulaire**.

E Deuxième loi de Kepler



Les aires A_1 et A_2 , balayées pendant des durées Δt égales, sont égales. L'arc BC est donc plus long que l'arc DE. Ces deux arcs étant parcourus pendant la même durée Δt , la valeur de la vitesse moyenne de la planète P entre B et C est supérieure à celle entre D et E.

d. Généralisation

Les trois lois de Kepler énoncées dans le cas de planètes en orbite autour du Soleil peuvent être généralisées à tout satellite ou planète en orbite autour d'un astre de masse M . Elles permettent de prévoir leur mouvement.

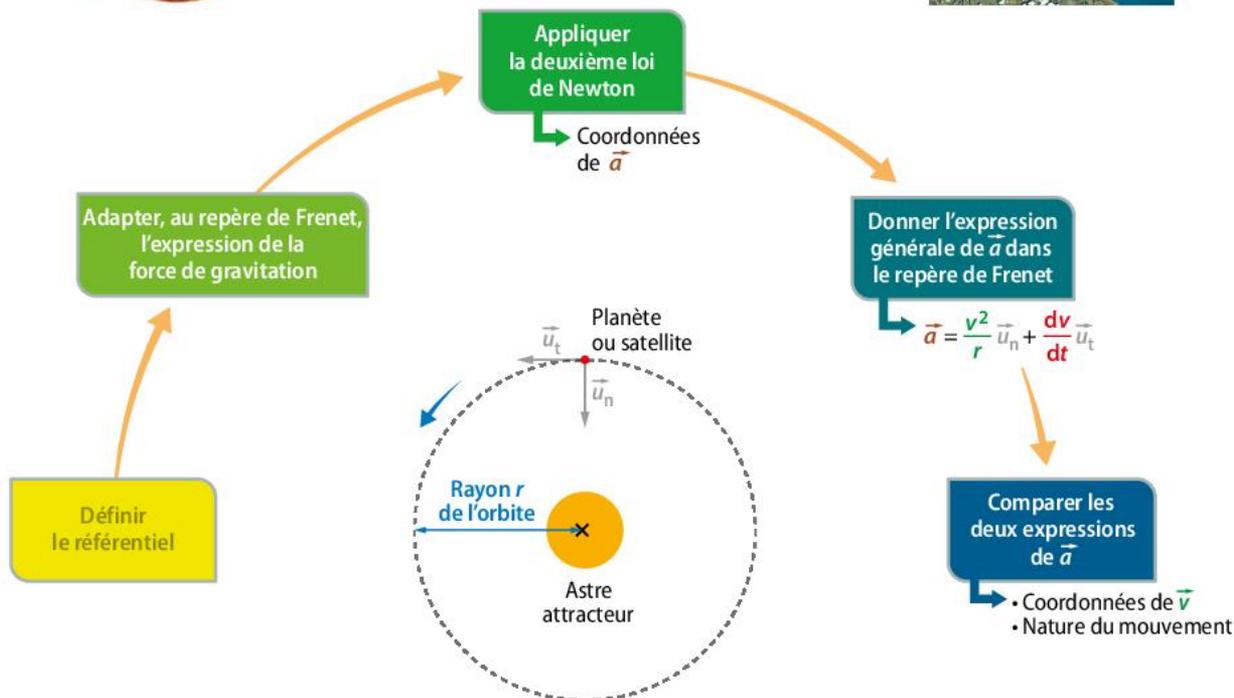


▶ VIDÉO DE COURS
 Lois de Kepler
▶ QCM
 Version interactive

1 Le mouvement des satellites et des planètes



Étude du mouvement circulaire
du centre de masse d'une planète ou d'un satellite
dans un référentiel astrocyclique supposé galiléen



2 Les lois de Kepler

Les trois lois de Kepler permettent d'étudier le mouvement d'un corps autour d'un astre attracteur.

L'application de la deuxième loi de Newton, dans le référentiel astrocyclique auquel est associé le repère de Frenet, permet de retrouver la troisième loi de Kepler dans le cas d'un mouvement circulaire et uniforme :



Expression de T ,
période de révolution :

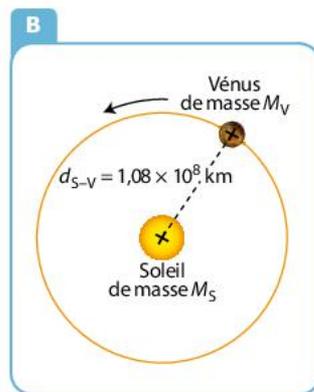
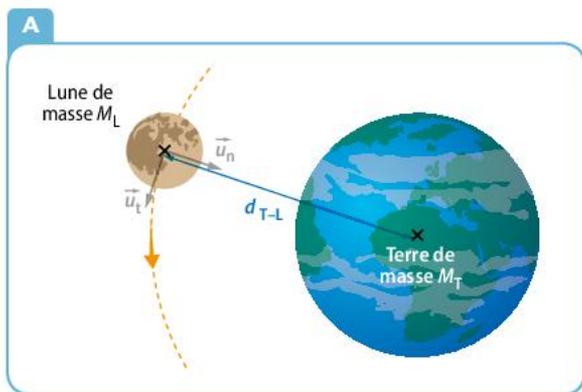
$$T = \frac{2\pi \times r}{v}$$

Remplacement de v par
son expression établie à l'aide
de la deuxième loi de Newton

Réarrangement
de l'expression de T :

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M} = \text{constante}$$

Troisième loi de Kepler
dans le cas d'un
mouvement circulaire



Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s), puis vérifier la correction p. 147.

A

B

C

1 Le mouvement des satellites et des planètes

Si erreur, revoir § 1 p. 48

1. Pour étudier le mouvement de la Lune autour de la Terre, le référentiel le plus approprié est :	le référentiel géocentrique.	un référentiel terrestre.	le référentiel héliocentrique.
2. La force de gravitation exercée par la Terre sur la Lune (schéma A) a pour expression :	$\vec{F} = -G \times \frac{M_L \times M_T}{d_{T-L}^2} \vec{u}_t$	$F = -G \times \frac{M_T}{d_{T-L}^2} \vec{u}_n$	$\vec{F} = G \times \frac{M_L \times M_T}{d_{T-L}^2} \vec{u}_n$
3. D'après la deuxième loi de Newton, le vecteur accélération de la Lune, lors de son mouvement autour de la Terre (schéma A), a pour expression :	$\vec{a} = G \times \frac{M_T}{d_{T-L}^2} \vec{u}_n$	$\vec{a} = G \times \frac{M_L}{d_{T-L}^2} \vec{u}_n$	$\vec{a} = G \times \frac{M_L \times M_T}{d_{T-L}^2} \vec{u}_n$
4. Le vecteur vitesse de la Lune lors de son mouvement circulaire autour de la Terre est :	tangent au mouvement.	normal au mouvement.	de valeur constante.

2 Les Lois de Kepler

Si erreur, revoir § 2 p. 49

5. Lorsqu'une comète sur son orbite, dans le référentiel héliocentrique, s'éloigne du Soleil, la valeur de sa vitesse :	augmente.	diminue.	reste constante.
6. D'après la troisième loi de Kepler appliquée dans le référentiel héliocentrique, pour une trajectoire circulaire de rayon r et de période de révolution T :	$T^2 = \text{cte} \times r^3$	$\frac{T^2}{r^3} = \text{cte}$	$\frac{T^3}{r^2} = \text{cte}$
7. D'après la troisième loi de Kepler appliquée dans le référentiel héliocentrique, pour une trajectoire circulaire de rayon $r_{\text{planète}}$ et de période de révolution $T_{\text{planète}}$:	$\frac{T_{\text{Vénus}}^2}{T_{\text{Neptune}}^2} = \frac{r_{\text{Vénus}}^3}{r_{\text{Neptune}}^3}$	$\frac{T_{\text{Vénus}}^2 \times r_{\text{Neptune}}^3}{T_{\text{Neptune}}^2 \times r_{\text{Vénus}}^3}$	$\frac{T_{\text{Vénus}}^2}{r_{\text{Neptune}}^3} = \frac{T_{\text{Neptune}}^2}{r_{\text{Vénus}}^3}$
8. Dans le référentiel héliocentrique, et dans l'approximation des trajectoires circulaires, le rapport $\frac{T^2}{d_{S-V}^3}$ est $3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$. La période de révolution de Vénus est :	$3,8 \times 10^{14} \text{ s}$	$2,3 \times 10^3 \text{ jours}$	$1,9 \times 10^7 \text{ s}$

Les bons réflexes

Si l'énoncé demande de...

Il est nécessaire de...

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

Réflexe 1

- Schématiser l'astre attracteur, le système {planète} et le repère de Frenet.
- Exprimer la force de gravitation $\vec{F}_{A/P} = G \times \frac{m \times M}{r^2} \vec{u}_n$ et appliquer la deuxième loi de Newton $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}$ pour obtenir le vecteur accélération \vec{a} .
- Rappeler, dans le repère de Frenet, l'expression du vecteur accélération : $\vec{a} = \frac{v^2}{r} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t$.
- En déduire, par identification des deux expressions de \vec{a} , les caractéristiques du vecteur vitesse \vec{v} .

→ Ex. 2 p. 54

Établir la troisième loi de Kepler dans le cas d'un mouvement circulaire.

Réflexe 2

- Utiliser l'expression de la période de révolution $T = \frac{2\pi \times r}{v}$.
- Remplacer la valeur v de la vitesse obtenue à partir de la deuxième loi de Newton dans l'expression de T .
- Exprimer le rapport $\frac{T^2}{r^3}$.

→ Ex. 6 p. 55

Exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas d'un mouvement circulaire.

Réflexe 3

- Énoncer la troisième loi de Kepler.
- Isoler la grandeur recherchée.
- Effectuer les calculs en faisant attention aux unités.

→ Ex. 6 p. 55

1 Exercice résolu

L'astéroïde Sylvia

| Exploiter des informations ; effectuer des calculs ; discuter un modèle.

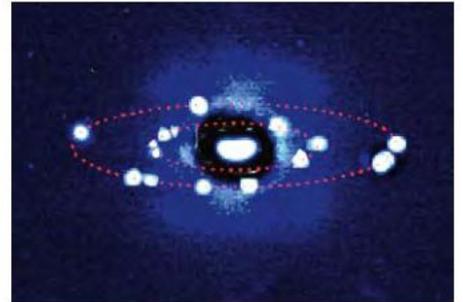
L'astéroïde Sylvia est le premier astéroïde découvert à posséder deux satellites naturels baptisés Remus et Romulus.

On s'intéresse au mouvement du centre de masse P de l'astéroïde Sylvia qui décrit autour du Soleil une orbite assimilée à un cercle de rayon r .

L'étude se fait dans le référentiel héliocentrique considéré comme galiléen.

Donnée

Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.



> Photomontage montrant les positions de Remus et Romulus autour de Sylvia

1. a. Montrer que, dans le cas d'un mouvement circulaire, le mouvement de l'astéroïde Sylvia de masse M , autour du Soleil de masse M_s , est uniforme.

b. Établir l'expression de la valeur v de la vitesse de l'astéroïde Sylvia sur son orbite, puis donner son expression vectorielle \vec{v} .

2. a. Établir la troisième loi de Kepler dans le référentiel héliocentrique.

b. Le graphique ci-contre a été tracé en prenant en compte les paramètres caractéristiques de trois planètes du système solaire dont la trajectoire autour du Soleil est quasi circulaire.

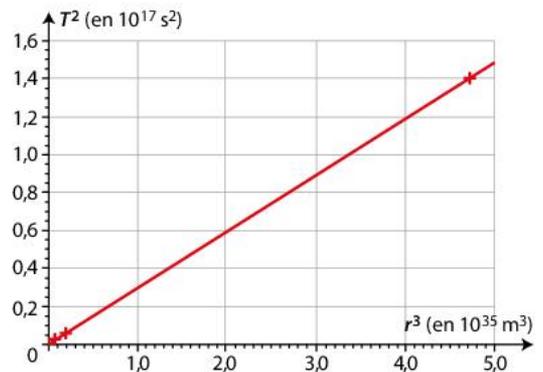
Ce graphique traduit-il la troisième loi de Kepler ?

3. L'astéroïde Sylvia gravite autour du Soleil avec une période de révolution de 6,521 ans.

Déterminer le rayon r de l'orbite de l'astéroïde Sylvia.

4. Les deux satellites Romulus et Remus décrivent une orbite circulaire autour de Sylvia. La période de révolution de Romulus est 87,6 heures. Les distances entre chaque satellite et Sylvia sont 710 kilomètres pour Remus et 1 360 kilomètres pour Romulus.

En appliquant la troisième loi de Kepler, déterminer la masse de l'astéroïde Sylvia dans le cadre de l'hypothèse d'un mouvement circulaire.



Solution rédigée

On utilise le Réflexe 1.

Schématisation de la situation

Expression de la force de gravitation et application de la deuxième loi de Newton

Rappel de l'expression de l'accélération dans le repère de Frenet

Déduction, par identification des expressions, des caractéristiques de la vitesse

1. a. On étudie le mouvement du système {Sylvia} modélisé par son centre de masse P dans le référentiel héliocentrique supposé galiléen.

La seule force qui s'applique sur le système est la force de gravitation exercée par le Soleil. Son expression dans le repère de Frenet est : $\vec{F}_{S/P} = G \times \frac{M_S \times M}{r^2} \vec{u}_n$.

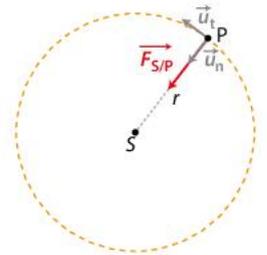
Appliquons la deuxième loi de Newton :

$$\Sigma \vec{F} = M \vec{a} \text{ donc } \vec{F}_{S/P} = G \times \frac{M_S \times M}{r^2} \vec{u}_n = M \vec{a}. \text{ D'où } \vec{a} = G \times \frac{M_S}{r^2} \vec{u}_n.$$

Dans le repère de Frenet, $\vec{a} = \frac{v^2}{r} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t$.

Par identification des accélérations tangentielles, $\frac{dv}{dt} = 0$, il vient $v = \text{cte}$, le mouvement est uniforme.

b. Par identification des accélérations normales, $\frac{v^2}{r} = G \times \frac{M_S}{r^2}$. On en déduit que $v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$. Le vecteur vitesse a pour expression $\vec{v} = v \times \vec{u}_t$ avec $v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$.



On utilise le Réflexe 2.

Utilisation de la définition de la période T

Remplacement de l'expression de v dans T

Expression du rapport $\frac{T^2}{r^3}$

2. a. La période de révolution de l'astéroïde est $T = \frac{2\pi \times r}{v}$,

$$\text{soit } T = 2\pi \times r \times \sqrt{\frac{r}{G \times M_S}} \text{ d'où } T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_S}$$

et finalement $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_S} = \text{constante}$.

b. La représentation graphique $T^2 = f(r^3)$ est une droite qui passe par l'origine. Il y a donc proportionnalité entre T^2 et r^3 : $T^2 = k \times r^3$ où k est le coefficient de proportionnalité.

Ainsi, $\frac{T^2}{r^3} = k$, ce qui confirme la troisième loi de Kepler.

3. La période de révolution de Sylvia est 6,521 ans, soit $2,058 \times 10^8$ s.

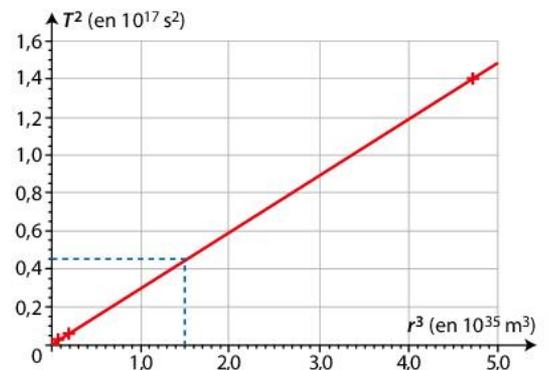
On calcule :

$$T_{\text{Sylvia}}^2 = 0,4235 \times 10^{17} \text{ s}^2.$$

On lit graphiquement :

$$r^3 = 1,5 \times 10^{35} \text{ m}^3,$$

d'où $r = 5,3 \times 10^{11}$ m.



On utilise le Réflexe 3.

Énoncé de la relation $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M}$

Isolement de la grandeur recherchée

Calcul en faisant attention aux unités

4. Par application de la troisième loi de Kepler aux satellites de Sylvia, on a :

$$\left(\frac{T^2}{r^3}\right)_{\text{Remus}} = \left(\frac{T^2}{r^3}\right)_{\text{Romulus}} = \frac{4\pi^2}{G \times M}$$

$$\text{Donc } M = \frac{4\pi^2}{G} \times \left(\frac{r^3}{T^2}\right)_{\text{Romulus}}$$

$$M = \frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}} \times \frac{(1\,360 \times 10^3)^3 \text{ m}^3}{(87,6 \times 3\,600)^2 \text{ s}^2} \text{ d'où } M = 1,50 \times 10^{19} \text{ kg}.$$

La masse de Sylvia est $1,50 \times 10^{19}$ kg.

Parcours d'exercices CORRIGÉS

Ce que je dois savoir et savoir faire

- 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.
- Capacité numérique : exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.

Appliquer le cours

2

6

S'entraîner

8

10

13

Vers le BAC

14

14 15

1 Le mouvement des satellites et des planètes

2 Exploiter les coordonnées d'un vecteur accélération

Mobiliser et organiser ses connaissances.



Le centre de masse P de Phobos, satellite naturel de la planète Mars, est en mouvement circulaire autour de cette planète.

1. Déterminer les coordonnées du vecteur accélération du centre de masse de Phobos dans le repère de Frenet lié au référentiel « marsocentrique ».
2. Montrer que le mouvement de P est uniforme.

Utiliser le réflexe 1

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

Effectuer un calcul.

Vénus a une trajectoire quasiment circulaire dans le référentiel héliocentrique.

1. Donner l'expression vectorielle de la force de gravitation exercée par le Soleil sur Vénus.
2. Par application de la deuxième loi de Newton, déterminer les caractéristiques du vecteur accélération du centre de masse V de Vénus dans le référentiel héliocentrique.

Données

- Masse du Soleil : $M_S = 1,99 \times 10^{30}$ kg.
- Distance moyenne entre le centre du Soleil et le centre de Vénus : $r = 1,08 \times 10^8$ km.
- Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N·m²·kg⁻².

4 Déterminer les caractéristiques d'une vitesse

Mobiliser et organiser ses connaissances.

Le télescope spatial Hubble a permis de nombreuses découvertes dans le domaine de l'astrophysique. Il est placé sur une orbite quasiment circulaire à une altitude $h = 600$ km par rapport à la surface de la Terre.



1. Par application de la deuxième loi de Newton, déterminer les coordonnées du vecteur accélération du centre de masse H de Hubble dans le repère de Frenet lié au référentiel géocentrique.

2. Déterminer les coordonnées du vecteur vitesse de Hubble dans le repère de Frenet.

3. Calculer la valeur de la vitesse de Hubble dans le référentiel géocentrique.

Données

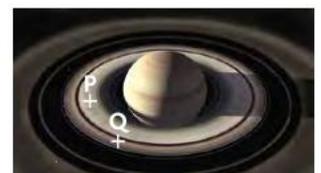
- Masse de la Terre : $M_T = 5,97 \times 10^{24}$ kg.
- Rayon de la Terre : $R_T = 6,37 \times 10^3$ km.
- Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N·m²·kg⁻².

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

Effectuer des calculs.

Les anneaux de Saturne sont essentiellement composés de glace et de poussière.

Si on néglige l'interaction des particules des anneaux entre elles et dans l'approximation de trajectoires circulaires, chaque constituant est animé d'un mouvement circulaire de rayon r avec une vitesse de valeur $v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$ dans le référentiel « saturnocentrique ».



1. Comparer la valeur de la vitesse de deux constituants P et Q positionnés sur deux anneaux différents.

2. Les périodes de révolution des constituants P et Q sont-elles identiques ?

2 Les lois de Kepler

VIDÉO DE COURS Lois de Kepler – QR Code p. 50

6 Établir la troisième loi de Kepler (1)

CORRIGÉ | Effectuer des calculs.

Europe est un satellite de Jupiter, de masse $M_J = 1,90 \times 10^{27}$ kg. Son orbite, de rayon r , est supposée circulaire. Sa vitesse a pour valeur :

$$v = \sqrt{\frac{G \times M_J}{r}} \text{ avec } G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$

- Établir l'expression de sa période de révolution T .
- En déduire la valeur du rapport $\frac{T^2}{r^3}$, puis énoncer la troisième loi de Kepler dans le référentiel « jupiterocentrique ». **Utiliser le réflexe 2**
- Calculer le rayon de l'orbite d'Europe sachant que $T = 3,02 \times 10^5$ s. **Utiliser le réflexe 3**

7 Exploiter la troisième loi de Kepler (2)

| Exploiter un tableau.

Les plus gros satellites de Jupiter, encore appelés satellites galiléens, ont été découverts par GALILÉE.

On donne les périodes de révolution T et le rayon r de la trajectoire quasi circulaire de deux de ces satellites :

Satellite	T (jours)	r (km)
Io	1,77	$4,22 \times 10^5$
Ganymède	7,15	$1,07 \times 10^6$

- Énoncer la troisième loi de Kepler dans le référentiel « jupiterocentrique ».
- Montrer que les données du tableau confirment que ces deux satellites sont en orbite autour de Jupiter.

Exercices S'entraîner

8 Connaître les critères de réussite

CORRIGÉ

Satellite CFOSAT

| Mobiliser ses connaissances ; effectuer des calculs.

Le 29 octobre 2018, le satellite CFOSAT, de masse m , a été mis en orbite circulaire autour de la Terre à une altitude de 519 km par le CNES et son homologue chinois le CNSA, pour cartographier les vents et les vagues à la surface des océans.



- Schématiser la situation et représenter la force de gravitation exercée par la Terre sur le satellite.
- Montrer que le mouvement du centre de masse du satellite CFOSAT est uniforme dans le référentiel géocentrique.
- Donner les caractéristiques du vecteur vitesse \vec{v} du centre de masse du satellite dans ce référentiel.
- Déterminer la période de révolution T du satellite.

Données

- Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.
- Masse de la Terre : $M_T = 6,0 \times 10^{24}$ kg.
- Rayon de la Terre : $R_T = 6,4 \times 10^3$ km.

Critères de réussite

J'ai réalisé un schéma suffisamment grand et avec soin (question 1).

J'ai respecté les notations de l'énoncé et j'ai défini celles que j'ai introduites (question 2).

J'ai converti les kilomètres en mètres pour faire les calculs (questions 3 et 4).

9 À chacun son rythme

Satellites d'Uranus

| Effectuer des calculs ; rédiger une explication.

Commencer par résoudre l'énoncé compact. En cas de difficultés, passer à l'énoncé détaillé.

La planète Uranus possède plusieurs satellites.

Le tableau ci-dessous donne la période de révolution T et le rayon r de la trajectoire quasi circulaire de quatre de ces satellites dans le référentiel centré sur Uranus.

Satellite	Miranda	Ariel	Umbriel	Titania
r (km)	129 780	192 240	265 970	435 840
T (jours)	1,413	2,520	4,1444	8,706



Énoncé compact

La troisième loi de Kepler est-elle vérifiée dans le référentiel centré sur Uranus ?

Énoncé détaillé

- Énoncer la troisième loi de Kepler dans le référentiel centré sur Uranus.
- Déterminer, pour chaque satellite, le rapport $\frac{T^2}{r^3}$ en précisant son unité.
- La troisième loi de Kepler est-elle vérifiée dans le référentiel centré sur Uranus ?

10 Balance cosmique

Utiliser un modèle pour prévoir ; effectuer des calculs.

Le tableau ci-dessous donne la période de révolution de quelques planètes du système solaire, ainsi que le rayon de leur orbite assimilable à un cercle dans le référentiel héliocentrique.

Satellite	Mars	Jupiter	Saturne
r ($\times 10^6$ km)	228	778	1 427
T (an)	1,88	11,86	29,44

- Établir l'expression de la valeur de la vitesse du centre de masse d'une de ces planètes dans le référentiel héliocentrique.
- En déduire l'expression de sa période de révolution en fonction de G , r et M_S (masse du Soleil).
- Donner l'expression du rapport $\frac{T^2}{r^3}$ dans le référentiel héliocentrique. La troisième loi de Kepler est-elle vérifiée ?
- Déterminer la masse M_S du Soleil.
- Justifier en quoi la troisième loi de Kepler est une « balance cosmique ».

Données

- Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.
- $1 \text{ an} = 3,156 \times 10^7 \text{ s}$.

11 Résolution de problème

Station spatiale internationale

Construire les étapes d'une résolution de problème.

La station spatiale internationale ISS gravite autour de la Terre à une vitesse de valeur moyenne $7,66 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Elle évolue sur une orbite terrestre basse, zone de l'orbite terrestre allant jusqu'à 2 000 km d'altitude. On y retrouve des satellites de télédétection, des satellites de télécommunications, ainsi que quelques stations spatiales, dont la Station spatiale internationale.

- Dans l'approximation des trajectoires circulaires, déterminer l'altitude h de l'ISS.

Coup de pouce QR Code p. 50

Données

- Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.
- Masse de la Terre : $M_T = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$.
- Rayon de la Terre : $R_T = 6,4 \times 10^3 \text{ km}$.

12 Geostationary Satellite

Pratiquer une langue vivante étrangère.

Arianespace has put the CondoSat Saudi Geostationary Satellite 1/Hellas Sat 4 in orbit for operators KACST and Hellas Sat.

This first launch of the year for Arianespace took place on Tuesday 5th February at 18:01 (Kourou time) from the Guiana Space Centre (CSG), Europe's spaceport.



This placement marks the 103rd Ariane 5 launch and brings the number of satellites placed in geostationary orbit by Arianespace to 374.

The CondoSat is in circular orbit in the equatorial plane, at altitude h , in the geocentric reference frame and is also considered to be in the Galilean reference frame.

- Define the term geostationary.
- a. Give the characteristics of the acceleration \vec{a} and speed \vec{v} of the CondoSat's center of mass in the geocentric reference frame.
b. Show that its movement is uniform.
- Justify that the period of revolution of the CondoSat must be equal to that of the Earth.
- Determine the altitude h of the geostationary orbit on which the CondoSat is located.

Data

- Universal gravitational constant: $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.
- Mass of the Earth: $M_T = 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$.
- Earth radius: $R_T = 6.4 \times 10^3 \text{ km}$.
- Earth revolution period: $T_T = 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s}$.

13 Python

Des satellites artificiels...

Utiliser un langage de programmation.

Trois systèmes de positionnement par satellites sont actuellement opérationnels : le système américain GPS, le système russe GLONASS et le système européen GALILEO. Ces satellites sont en orbite circulaire autour de la Terre à une altitude h . On présente ci-dessous un extrait du programme en langage python permettant de représenter la courbe $T^2 = f(r^3)$ où T représente la période de révolution d'un satellite et r le rayon de son orbite.

PROGRAMME python – Lien p. 50

```

28 #Variables et régression linéaire moyenne
29 #Calcul des variables associées à la fonction
30 Tcarre = T**2
31 rcube = (r*1000)**3
32 #Calcul de la régression linéaire
33 regression = np.polyfit(rcube, Tcarre,1)
34 pente_moyenne=regression[0]
35 init_a=6.00e-14
36 #Variables pour la régression
37 rcube_regression=np.linspace(0, rcube[2]*2,5)
38 T_regression = init_a*rcube_regression
    
```

- a. Exécuter le programme. Quelle est l'allure du nuage de points obtenu ?
b. Retrouver la ligne permettant de réaliser la modélisation mathématique de la courbe $T^2 = f(r^3)$.
c. Quelle est la valeur affectée par défaut au coefficient directeur de cette droite ?
- Ajuster, à l'aide du curseur, la droite modélisée afin qu'elle passe au mieux par tous les points.
- Justifier que les résultats obtenus sont en accord avec la troisième loi de Kepler.
- Calculer la masse de la Terre.

Donnée

- Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.

Écrire correctement

la valeur de la force de gravitation

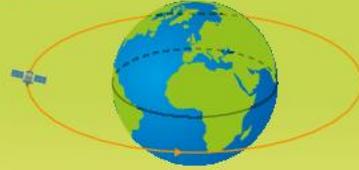
Ne pas oublier le « carré » !

$$F = G \frac{m \times M_T}{r^2}$$



Attention aux unités :
les distances s'expriment en **m** et pas en **km**.

Bien définir « géostationnaire »



Un satellite géostationnaire est immobile pour un observateur situé dans un référentiel terrestre.

Un satellite géostationnaire n'est pas immobile dans le référentiel géocentrique.

Préparation à l'écrit

→ Les bons réflexes 1, 2 et 3 sont présentés p. 52

14
60 min

Les lunes de Saturne

| Faire un schéma adapté ; effectuer des calculs.

En 2019, vingt lunes supplémentaires de Saturne ont été découvertes. Ainsi, 82 satellites naturels connus à ce jour orbitent autour de cette planète.

A Données sur la lune S/2004 S 24

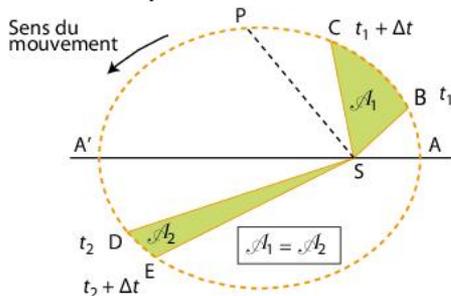
Saturne est la planète du système solaire qui détient actuellement le record du nombre de lunes.

On considère la trajectoire de la lune S/2004 S 24 comme circulaire dans le référentiel saturnocentrique.

Sa période T de révolution est 3,54 ans.

Le rayon r de son orbite est $2,29 \times 10^7$ km.

B Deuxième loi de Kepler dans le référentiel héliocentrique



Les aires A_1 et A_2 , balayées pendant des durées Δt égales, sont égales. L'arc \widehat{BC} est donc plus long que l'arc \widehat{DE} . Ces deux arcs étant parcourus pendant la même durée Δt , la valeur de la vitesse moyenne de la planète P entre B et C est supérieure à celle entre D et E.

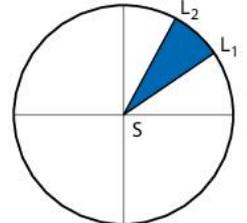
1. a. Faire un schéma de la lune S/2004 S 24 en orbite autour de Saturne.

b. Représenter le repère de Frenet centré sur le système muni des vecteurs unitaires tangentiel \vec{u}_t et normal \vec{u}_n .
c. Donner l'expression de la force de gravitation $\vec{F}_{S/L}$ exercée par Saturne (S) sur la lune (L) S/2004 S 24.

2. Par application de la deuxième loi de Newton, déterminer le vecteur accélération \vec{a} du système. **Utiliser le réflexe 1**

3. a. Montrer que le mouvement circulaire de la lune S/2004 S 24 autour de Saturne est uniforme.

b. On a représenté ci-contre l'aire balayée par le segment [SL] pendant une durée Δt . Reproduire et compléter ce schéma afin d'illustrer la deuxième loi de Kepler dans le cas d'un mouvement circulaire.



4. Déterminer les caractéristiques du vecteur vitesse de la lune S/2004 S 24.

5. a. Montrer que la période de révolution T de cette lune a pour expression : $T = 2\pi \times \sqrt{\frac{r^3}{G \times M_S}}$.

Utiliser le réflexe 2

b. Calculer la masse de Saturne.

Utiliser le réflexe 3

6. La lune Météis a une période de révolution T de 0,295 jour et l'orbite circulaire a un rayon de 128 000 km. Météis peut-elle être une lune de Saturne ?

Coup de pouce QR Code p. 50

Données

- Constante universelle de gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.
- 1 an = $3,156 \times 10^7$ s.

15 30
CORNGE min

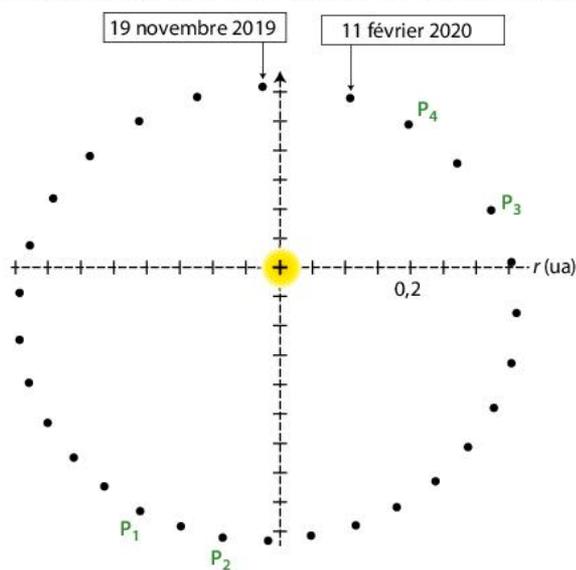
Vérification des trois lois de Kepler

On se propose de vérifier les trois lois de Kepler dans le référentiel héliocentrique à partir de la trajectoire de Mercure et de données astronomiques des autres planètes du système solaire.



A Trajectoire de Mercure dans le référentiel héliocentrique entre le 19 novembre et le 11 février 2020

Les données ayant permis de tracer cette trajectoire sont issues du site de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides situé au sein de l'Observatoire de Paris.



Deux positions consécutives de la planète sont séparées de trois jours.

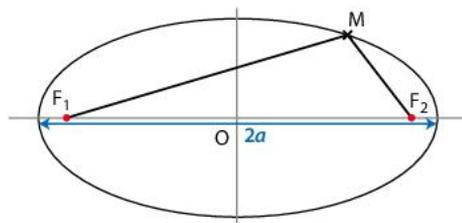
B Première loi de Kepler dans le référentiel héliocentrique

Dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire du centre de masse d'une planète est une ellipse dont le centre de masse du Soleil est l'un des foyers.

C Deuxième loi de Kepler dans le référentiel héliocentrique

Le segment de droite reliant les centres de masse du Soleil et d'une planète balaie des aires égales pendant des durées égales.

D Propriétés d'une ellipse



Une ellipse de foyers F_1 et F_2 est l'ensemble des points M d'un plan qui vérifie la relation :

$$MF_1 + MF_2 = 2a$$

où a est le demi-grand axe de l'ellipse.

Utiliser le schéma A pour répondre aux questions suivantes.

1. Vérification de la première loi de Kepler

RÉA Vérifier, sur deux positions choisies, que la trajectoire de Mercure dans le référentiel héliocentrique est elliptique.

2. Deuxième loi de Kepler

a. RÉA On a repéré sur la trajectoire différentes positions P_1, P_2, P_3 et P_4 de Mercure. Tracer sur le document fourni les secteurs elliptiques SP_1P_2 puis SP_3P_4 .

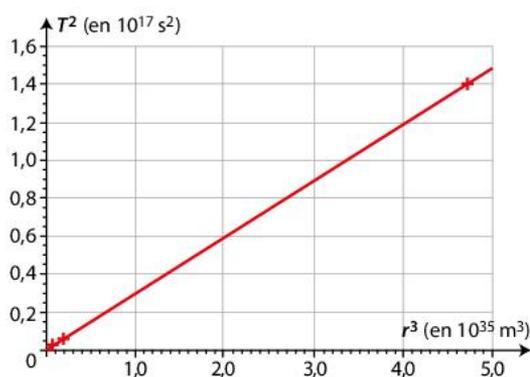
b. RÉA Évaluer l'aire des surfaces ainsi délimitées.

c. VAL La deuxième loi de Kepler est-elle vérifiée ?

3. Troisième loi de Kepler

On se place dans l'approximation du mouvement circulaire pour toutes les planètes du système solaire.

Le graphique ci-dessous donne l'évolution du carré de la période de révolution des planètes en fonction du cube du rayon de leur orbite.



a. VAL Montrer que ce graphique est en accord avec la troisième loi de Kepler.

b. ANA-RAIS L'astéroïde Cérès fut découvert le 1^{er} janvier 1801 par Giuseppe PIAZZI. Avec un diamètre d'environ 950 km, Cérès est l'objet le plus grand et le plus massif de la ceinture d'astéroïdes. Sa période de révolution autour du Soleil est 4,5 ans.

Déterminer le rayon de l'orbite de Cérès.

4

Premier principe de la thermodynamique et bilan énergétique



L'aluminium est un matériau très utilisé en construction dans des alliages.

- Quel type de traitement subit-il pour améliorer sa résistance mécanique ?

➤ Rendez-vous : exercice 17 p. 70

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système. **Activité 1 p. 60**
- Prévoir le sens d'un transfert thermique. **Activité 1 p. 60**
- 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. **Activité 1 p. 60**
- 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. **Activité 2 p. 61**
- Procéder à l'étude énergétique d'un système thermodynamique. **Activité 1 p. 60**

Activité expérimentale 1

Premier principe de la thermodynamique

Notions

- Variation d'énergie interne
- Transferts d'énergie

La documentation technique d'une bouilloire indique : « Puissance électrique : 1 200 W ». Cette bouilloire peut chauffer 200 g d'eau de 20 à 40 °C en moins de 30 secondes. Le premier principe de la thermodynamique permet d'expliquer ce transfert d'énergie entre la bouilloire et l'eau.



► **Objectif de l'activité :** Comment le premier principe de la thermodynamique s'énonce-t-il et quelles informations fournit-il ?

A Énergie électrique transférée W_{elec}

L'énergie électrique transférée est liée à la durée de fonctionnement de l'appareil et à sa puissance :

$$W_{\text{elec}} = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t = U \times I \times \Delta t$$

W_{elec} en J $\mathcal{P}_{\text{elec}}$ en W U en V I en A Δt en s

RAPPEL

Le calorimètre est une enceinte thermiquement isolée. Il n'y a pas de transfert thermique Q entre l'intérieur du calorimètre et l'extérieur.

COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

• Énergie interne

L'énergie interne U d'un système macroscopique est égale à la somme de ses énergies microscopiques :

- l'énergie cinétique microscopique, liée à l'agitation thermique des particules qui constituent le système. Elle augmente avec la température du système ;
- l'énergie potentielle microscopique, liée aux interactions entre les particules qui constituent le système.

MATÉRIEL DISPONIBLE



• Premier principe de la thermodynamique

La variation ΔU de l'énergie interne d'un système **au repos macroscopique**, qui n'échange pas de matière avec l'extérieur 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 transfert thermique Q ou par travail W .

$$\Delta U \text{ en J} \rightarrow \Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W \quad \begin{matrix} W \text{ en J} \\ Q \text{ en J} \end{matrix}$$

Pratique expérimentale

Élaborer et mettre en œuvre un protocole ANA-RAIS-REA

- Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant d'élever de 5 °C la température de 200 g d'eau dans un calorimètre, en transférant de l'énergie que l'on déterminera, grâce à un conducteur ohmique.

Exploiter des résultats ANA-RAIS

- Indiquer pour le système {eau et calorimètre} :
 - s'il a reçu ou cédé de l'énergie microscopique, (potentielle ou cinétique) ;
 - si son énergie interne augmente ou pas ;
 - si un transfert d'énergie a eu lieu par travail, ou par transfert thermique, de l'extérieur vers le système.
- On admet que toute l'énergie reçue par travail électrique W_{elec} par le conducteur ohmique est intégralement restituée par transfert thermique Q_1 à l'eau de masse m et au calorimètre.

Utiliser un modèle pour décrire REA

Déduire du premier principe de la thermodynamique :

- que la variation d'énergie interne ΔU_1 du conducteur ohmique est nulle ;
- la valeur expérimentale de la variation ΔU_2 d'énergie interne du système {eau et calorimètre} de l'état initial à l'état final.

Utiliser un modèle pour prévoir REA

- On admet que la durée de chauffage est proportionnelle à la masse d'eau à chauffer et à son élévation de température dans une bouilloire. Estimer la durée maximale nécessaire pour chauffer 400 g d'eau de 20 à 50 °C avec la bouilloire décrite dans l'introduction.

Un pas vers le cours

Rendre compte à l'écrit COM

- Comment le premier principe de la thermodynamique s'énonce-t-il et quelles informations fournit-il ?

Activité 2 expérimentale

Variation d'énergie interne d'un système incompressible

Notions

- Variation d'énergie interne
- Capacité thermique d'un système incompressible

Dans un scooter, le liquide de refroidissement est un mélange d'eau et d'un antigel, l'éthylène glycol. La capacité de ce liquide incompressible à absorber de l'énergie est élevée mais inférieure à celle de l'eau. Ce liquide ne gèle cependant qu'à partir de températures inférieures à $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

► **Objectif de l'activité :** De quels paramètres la variation d'énergie interne d'un système incompressible dépend-elle ?



Tâche complexe

A Méthode des mélanges

Un corps chaud est placé dans un liquide froid contenu dans un calorimètre, dans le but de déterminer la capacité thermique du corps ou du liquide.

Un calorimètre est une enceinte thermiquement isolée de l'extérieur, mais à l'intérieur de laquelle il peut y avoir des transferts thermiques qui se compensent : $\Sigma Q \text{ intérieurs} = 0 \text{ J}$.

Variation d'énergie interne d'un calorimètre :

$$\Delta U_{\text{cal}} = C \times (T_f - T_i) = C \times (\theta_f - \theta_i)$$

avec C la capacité thermique du calorimètre.

Donnée

Capacité thermique massique : $c_{\text{cuivre}} = 385 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

MATÉRIEL ET PRODUITS DISPONIBLES



COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

• Capacité thermique massique c d'un système incompressible

La capacité thermique massique c d'un système incompressible est l'énergie absorbée par 1 kg de ce système pour élever sa température de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 1 K. Elle s'exprime en joule par kilogramme et par degré Celsius ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) ou en joule par kilogramme et par Kelvin ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

• Variation d'énergie interne d'un système incompressible

Lorsqu'un système incompressible de masse m passe d'une température initiale T_i à une température finale T_f , sa variation d'énergie interne ΔU a pour expression :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (T_f - T_i) = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

Cette variation ΔU d'énergie interne est positive si le corps s'échauffe et négative si le corps se refroidit.

Étapes de la démarche d'investigation

- RELIRE les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter.
- REFORMULER le problème en utilisant un vocabulaire scientifique.
- ÉMETTRE une hypothèse permettant d'y répondre.
- ÉLABORER un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée.
- NOTER les observations, les interpréter et conclure.

Investigation

APP · ANA-RAIS · RÉA · VAL · COM

- Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de justifier que l'eau serait un meilleur liquide de refroidissement que le liquide proposé, dans le cas du scooter de la photographie.

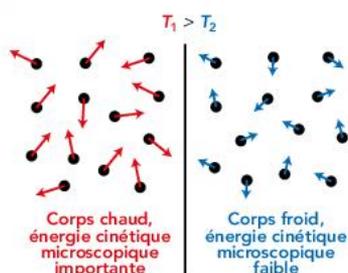
Un pas vers le cours

Rendre compte à l'écrit COM

- De quels paramètres la variation d'énergie interne ΔU d'un système incompressible dépend-elle ?

1 L'énergie interne et les modes de transfert de l'énergie

A Température et agitation thermique



➤ Plus la température est grande et plus l'agitation thermique est grande.

INFO

* Le système est ici réduit à un objet macroscopique de taille raisonnable, ce qui exclut des systèmes définis à l'échelle astronomique.

RAPPEL

Le transfert thermique Q lors du changement d'état d'un système de masse m est $Q = m \times L$ avec L la chaleur latente de changement d'état en $J \cdot kg^{-1}$.

B Bain-marie



➤ Le bain-marie permet d'amener l'eau à la température souhaitée grâce à un chauffage homogène. Certains bains-marie peuvent porter l'eau à ébullition.

a. Énergie interne d'un système

• Tout système macroscopique est composé d'un grand nombre d'entités microscopiques en mouvement et en interaction entre elles. Chacune possède une **énergie cinétique microscopique** liée à l'agitation thermique (schéma A) et une **énergie potentielle microscopique** liée à ses interactions avec les autres.

L'**énergie interne** U d'un système macroscopique est égale à la somme des énergies microscopiques, cinétique et potentielle, de toutes les entités microscopiques qui constituent le système.

b. Énergie totale d'un système

• L'énergie totale \mathcal{E}_{tot} d'un système* est la somme de ses énergies macroscopiques, cinétique \mathcal{E}_c et potentielle d'interaction \mathcal{E}_p , et de son énergie interne U :

$$\mathcal{E}_{\text{tot}} = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p + U$$

• La variation d'énergie totale de ce système est la somme de la variation de son énergie interne et de la variation de son énergie mécanique :

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{tot}} = \Delta \mathcal{E}_m + \Delta U$$

Lorsqu'un système est au repos macroscopique dans le référentiel d'étude, son énergie mécanique est constante. La **variation d'énergie totale** du système est alors égale à sa **variation d'énergie interne** :

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{tot}} \text{ en J} \quad \longleftarrow \quad \Delta \mathcal{E}_{\text{tot}} = \Delta U \quad \longleftarrow \quad \Delta U \text{ en J}$$

c. Deux modes de transfert de l'énergie

• Le travail W et le transfert thermique Q sont les deux modes de transfert de l'énergie entre le système et le milieu extérieur.

Le **travail** W est un transfert d'énergie qui s'effectue macroscopiquement de manière ordonnée ; il est lié au déplacement du point d'application d'une force s'exerçant sur le système.

Le **transfert thermique** Q est un transfert d'énergie qui s'effectue microscopiquement de manière désordonnée entre le système et l'extérieur. Lorsqu'il existe une différence de température entre eux, ce transfert d'énergie se fait spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

Un transfert thermique a pour conséquence macroscopique une modification de la température ou un changement d'état physique du système.

• Le travail et le transfert thermique sont des grandeurs **algébriques**.

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.

Exemple : Le système étudié est le conducteur ohmique du bain-marie de la photographie B. Il **reçoit** de l'énergie sous forme de travail électrique compté **positivement**. Il **cède** de l'énergie au milieu extérieur (l'eau) sous forme de transfert thermique compté **négativement**.

2 Le premier principe de la thermodynamique

a. Énoncé

lycee.hachette-education.com/physique-si/tle



Le premier principe de la thermodynamique énonce que la **variation ΔU 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** :

$$\Delta U \text{ en J} \quad \Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q \quad Q \text{ en J}$$

$W \text{ en J}$

b. Étude énergétique d'un système thermodynamique

Le premier principe de la thermodynamique permet d'établir le **bilan énergétique d'un système** qui n'échange pas de matière avec l'extérieur.

Pour établir un bilan d'énergie, il faut :

- **définir le système** au repos macroscopique, l'extérieur est alors le reste de l'Univers et écrire le premier principe ;
- **relever tous les transferts d'énergie** ayant lieu entre le système et l'extérieur en repérant le sens de chacun des transferts ; leur attribuer un signe positif si l'énergie entre dans le système et un signe négatif si elle en sort ;
- **effectuer la somme de tous ces transferts** : si la somme est positive, l'énergie interne du système a augmenté ; si elle est négative, l'énergie interne du système a diminué.

Vocabulaire

Un système est **incompressible** si sa masse volumique reste constante.

C Quelques capacités thermiques massiques

Matériau	c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
Aluminium $\text{Al}(\text{s})$	897
Eau $\text{H}_2\text{O}(\text{s})$	$2,06 \times 10^3$
Éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\ell)$	$2,44 \times 10^3$
Eau $\text{H}_2\text{O}(\ell)$	$4,18 \times 10^3$

> Le transfert thermique nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 kg d'eau est plus élevé pour l'eau liquide que pour l'eau solide.

D Un thé chaud



> Lorsque le système {liquide et tasse} se refroidit au contact de l'air et de la soucoupe, sa température diminue. Ainsi, son énergie interne diminue.

c. Énergie interne d'un système incompressible

- La capacité thermique d'un système **incompressible** est le produit de sa masse m et de sa capacité thermique massique c .

La **capacité thermique massique c** d'un système incompressible est l'énergie absorbée par 1 kg de ce système pour élever sa température de 1°C , c'est-à-dire aussi de 1 K.

Elle dépend de la nature du système et de son état physique (tableau C).

- Si l'on connaît la température initiale et la température finale d'un système incompressible, on peut calculer sa variation d'énergie interne.

Lorsqu'un système incompressible de masse m et de capacité thermique massique c passe d'une température initiale T_i à une température finale T_f , sa **variation d'énergie interne ΔU** a pour expression :

$$\Delta U \text{ en J} \quad \Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (T_f - T_i) = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

$m \text{ en kg}$ $c \text{ en } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ ou } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ $\theta \text{ en } ^\circ\text{C}$

en K

La variation ΔU d'énergie interne est positive si le système s'échauffe et négative si le système se refroidit (photographie D).



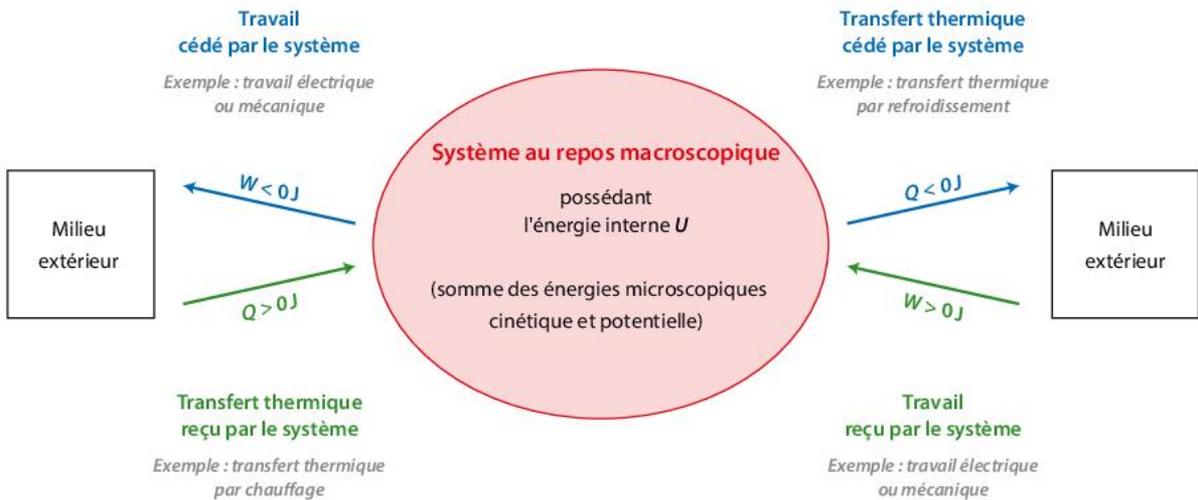
▶ **VIDÉO DE COURS**
Du premier principe
au bilan d'énergie

▶ **QCM**
Version interactive

1 L'énergie interne et les modes de transfert de l'énergie

Les entités microscopiques qui constituent un système possèdent de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle.

Deux modes de transfert de l'énergie
– le travail W
– le transfert thermique Q



2 Le premier principe de la thermodynamique

Variation d'énergie interne d'un système qui n'échange pas de matière avec l'extérieur, au repos macroscopique ($\Delta \mathcal{E}_m = 0$)

$$\Delta U \text{ en J} \rightarrow \Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q \leftarrow W \text{ et } Q \text{ en J}$$

Somme des transferts d'énergie entre système et milieu extérieur par travail W et/ou transfert thermique Q

Variation d'énergie interne ΔU d'un système incompressible de masse m et de capacité thermique massique c , dont la température varie :

$$\Delta U \text{ en J} \rightarrow \Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (T_f - T_i) = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

Annotations for the equation above:

- m en kg
- c en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ou $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- T en K
- θ en $^\circ\text{C}$

QCM

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s), puis vérifier la correction p. 147.

A

B

C

1 L'énergie interne et les modes de transfert de l'énergie

Si erreur, revoir § 1 p. 62

1. L'énergie interne U d'un système macroscopique est égale à la somme des énergies :	cinétique et potentielle, de toutes les entités microscopiques qui constituent le système.	cinétiques de toutes les entités microscopiques qui constituent le système.	potentielles de toutes les entités microscopiques qui constituent le système.
2. L'énergie totale d'un système est égale à :	son énergie interne.	la somme de ses énergies mécanique et interne.	son énergie mécanique.
3. L'énergie peut être transférée par :	travail.	transfert thermique.	travail et transfert thermique.
4. Pour le système {cornet de glace}, le transfert thermique Q avec l'extérieur :	 est positif.	est négatif.	s'effectue du cornet vers l'extérieur.
5. Lorsqu'un système est au repos macroscopique, sa variation d'énergie est égale :	à la variation de son énergie interne.	à la variation de son énergie mécanique.	à la variation de son énergie interne et de son énergie mécanique.

2 Le premier principe de la thermodynamique

Si erreur, revoir § 2 p. 63

6. La variation ΔU d'énergie interne d'un système au repos macroscopique est :	$W + Q$	$W - Q$	$W \times Q$
7. L'ampoule électrique étant le système étudié, on attribue :	 un signe positif à l'énergie qui sort du système.	un signe négatif à l'énergie qui sort du système.	la valeur 0 J à l'énergie qui sort du système.
8. La variation ΔU d'énergie interne d'un système incompressible de masse m , de capacité thermique massique c , qui passe d'une température initiale T_i à une température finale T_f s'écrit :	$\Delta U = m \times c \times (T_f - T_i)$	$\Delta U = m \times c \times (T_i - T_f)$	$\Delta U = m \times c \times (T_f + T_i)$
9. Si la température d'un système incompressible augmente, alors :	son énergie interne augmente.	son énergie interne diminue.	son énergie interne ne varie pas.
10. On chauffe 100 mL d'eau d'une tasse à café à l'aide d'un thermoplongeur de puissance 1 000 W pendant 2 minutes. La variation d'énergie interne de l'eau est :	 2 000 J.	$1,0 \times 10^5$ J.	$1,2 \times 10^5$ J.

 QCM version interactive

Les bons réflexes

Si l'énoncé demande de...

Il est nécessaire de...

Calculer la variation ΔU d'énergie interne d'un système ou effectuer son bilan énergétique.

Réflexe 1

Ex. 13 p. 69

- Définir le système, au repos macroscopique, qui n'échange pas de matière avec l'extérieur.
- Repérer les états initial et final du système.
- Identifier tous les transferts d'énergie entre le système et l'extérieur, repérer leur sens et signe.
- Effectuer la somme de ces transferts.
- Écrire le premier principe de la thermodynamique et interpréter le signe de cette somme.

Exploiter la variation d'énergie interne d'un système incompressible dont la température varie.

Réflexe 2

Ex. 15 p. 70

- Écrire la relation $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (T_f - T_i)$ ou $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$.
- Rechercher les données fournies dans le texte concernant le système.
- Exploiter la relation précédente pour déterminer la grandeur recherchée.

1 Exercice résolu

Capacité thermique massique d'un métal

Exploiter des informations ; mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs.

Dans un laboratoire un étudiant souhaite identifier un échantillon métallique de masse m_1 , en déterminant sa capacité thermique c . Voici ses résultats expérimentaux :

$$\theta_i = 81,0^\circ\text{C}$$

$$\theta_f = 0^\circ\text{C}$$

$$m_1 = 100\text{ g}$$

$$m_2 = 9,8\text{ g}$$

1. Exprimer la variation d'énergie interne ΔU_1 de l'échantillon de métal au cours de l'expérience.

2. a. On néglige tout échange autre que celui entre l'échantillon de métal et la glace. Écrire le premier principe appliqué au système {échantillon métallique}.

b. La capacité thermique massique de l'échantillon métallique est $c = -\frac{m_2 \times L_{\text{fus}}}{m_1 \times (\theta_f - \theta_i)}$. Calculer c et identifier le métal de l'échantillon.

Données

- Chaleur latente de fusion de l'eau : $334\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- Capacité thermique massique de l'alliage : $c_{\text{alliage}} = 909\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; $c_{\text{cuivre}} = 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; $c_{\text{fer}} = 450\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Solution rédigée

• On utilise le Réflexe 1.

Définition du système

Repérage des états initial et final

Identification de tous les transferts d'énergie et repérage de leur signe et sens

Écriture du premier principe de la thermodynamique et interprétation du signe de la somme

1. Le système {échantillon de métal} au repos macroscopique, n'échange pas de matière avec l'extérieur.

À l'état initial, le système est à la température ambiante θ_i ; à l'état final, le système est en équilibre thermique avec la glace fondante à la température $\theta_f = 0^\circ\text{C}$. La variation d'énergie interne du système, incompressible, de l'état initial i à l'état final f , est : $\Delta U_1 = m_1 \times c_{\text{métal}} \times (\theta_f - \theta_i)$.

2. a. Le seul transfert d'énergie échangé par le système est le transfert thermique $Q < 0$ car cédé à la glace plus froide (milieu extérieur) soit $W = 0\text{ J}$.

D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système entre l'état initial et l'état final, $\Delta U_1 = Q < 0$ donc son énergie interne diminue.

b. D'après la formule fournie : $c = -\frac{m_2 \times L_{\text{fus}}}{m_1 \times (\theta_f - \theta_i)}$.

$$\text{On a } c = \frac{9,8 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 334 \times 10^3\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}}{105 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 81,0\text{ K}} \text{ soit } c = 3,85 \times 10^2\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Il s'agit du cuivre de capacité thermique massique $c = 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

PROTOCOLE

- ✓ PESER l'échantillon métallique (m_1). Le placer suspendu par une ficelle dans un bain-marie à la température de 81°C environ. Noter la température initiale θ_i de l'échantillon.
- ✓ PRÉLEVER un gros morceau de glace fondante (sa température est alors 0°C).
- ✓ L'ESSUYER avec un chiffon propre et sec, puis rapidement :
 - le placer dans un cristalliseur ;
 - déposer l'échantillon de métal sur le morceau de glace ;
 - lorsque l'échantillon de métal ne fait plus fondre le morceau de glace, recueillir l'eau liquide dans un bécher préalablement taré et la peser (m_2).

2 Exercice résolu

Cuiseur solaire

| Exploiter des informations ; effectuer des calculs.

Pour réaliser un œuf poché avec un cuiseur solaire, on chauffe de 20 à 95 °C, 250 g d'eau dans un récipient pesant 500 g. On considère le système {eau et son récipient}.

1. a. Quels sont les signes des transferts d'énergie entre le système et l'enveloppe métallique du cuiseur solaire, le système et le soleil qui l'éclaire, le système et l'air environnant ?

b. Seul le transfert thermique entre le cuiseur solaire et le système est pris en compte, les autres transferts étant négligés, car très faibles d'un point de vue énergétique. Exprimer la variation d'énergie interne du système.

2. Calculer la variation d'énergie interne du système.



Donnée

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$;
capacité thermique du récipient : $c_r = 445 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Solution rédigée

• On utilise le Réflexe 1.

Définition du système au repos macroscopique, qui n'échange pas de matière avec l'extérieur

Repérage des états initial et final

Identification de tous les transferts d'énergie entre le système et l'extérieur et repérage de leur signe et sens

Écriture du premier principe de la thermodynamique et interprétation du signe de la somme

1. a. Le système au repos macroscopique étudié est l'eau et son récipient. Grâce au couvercle, il n'y a pas d'échange de matière avec le reste de l'Univers, qui est le milieu extérieur.

• Le système est dans l'état initial à 20 °C, dans l'état final à 95 °C.

• Les transferts d'énergie entre le système et le milieu extérieur sont des transferts thermiques.

Le transfert thermique Q_1 , entre le cuiseur solaire et le système, et le transfert thermique Q_2 , entre le Soleil et le système, permettent au système d'augmenter son énergie interne : ils sont comptés positivement.

Le transfert thermique Q_3 , entre l'air environnant et le système, diminue l'énergie interne du système : il est compté négativement.

• **b.** Par définition, $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$, donc $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q_1$ car $W = 0 \text{ J}$.

Q_1 est positif, donc l'énergie interne du système augmente.

• On utilise le Réflexe 2.

Écriture de la variation de l'énergie interne en fonction de la variation de température

Recherche des données dans le texte

Exploitation de la relation précédente pour déterminer la grandeur recherchée

2. La variation ΔU d'énergie interne est donnée par la relation :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = (m_{\text{eau}} \times c + m_{\text{récipient}} \times c_r) (\theta_f - \theta_i)$$

• Les données nécessaires aux calculs sont : $m_{\text{récipient}} = 500 \text{ g}$; $c_r = 445 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; $m_{\text{eau}} = 0,250 \text{ kg}$; $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; $\theta_i = 20 \text{ °C}$ et $\theta_f = 95 \text{ °C}$.

$$\Delta U = (0,250 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + 0,500 \text{ kg} \times 445 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) \times (95 \text{ °C} - 20 \text{ °C}).$$

$$\Delta U = 9,5 \times 10^4 \text{ J}$$

La variation ΔU d'énergie interne du système {eau et son récipient} est $9,5 \times 10^4 \text{ J}$.

Parcours d'exercices CORRIGÉS

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.
- Prévoir le sens d'un transfert thermique.
- Distinguer, dans un bilan d'énergie, la variation de l'énergie du système et les transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.
- 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.

Appliquer le cours

7

9

11

15

S'entraîner

18

18

18

17

Vers le BAC

24

24 25

24 25

24 25

1 L'énergie interne et les modes de transfert de l'énergie

3 Définir l'énergie interne

Mobiliser et organiser ses connaissances.

On étudie l'échauffement d'une plaquette de frein lors d'un freinage.

1. Proposer un système d'étude et identifier alors le milieu extérieur.
2. Définir l'énergie interne du système.

4 Citer les différentes contributions à l'énergie interne

Faire preuve d'esprit critique.

- L'affirmation suivante est-elle correcte ?
« Lorsqu'un solide cristallin au repos macroscopique s'échauffe, son énergie cinétique microscopique augmente, son énergie potentielle microscopique augmente, donc son énergie interne augmente. »

5 Connaître l'énergie microscopique (1)

Mobiliser et organiser ses connaissances.

De l'eau est maintenue à ébullition dans une casserole.

- Relier le début et la fin des phrases.

L'énergie potentielle microscopique de l'eau est modifiée.

L'énergie cinétique microscopique de l'eau reste constante.

6 Connaître l'énergie microscopique (2)

Rédiger une explication.

Le dérèglement climatique entraîne la fonte de la banquise et la destruction de l'habitat des ours polaires. Celui de la



photographie ci-avant est en équilibre sur la partie émergée d'un iceberg qui fond lentement.

1. Indiquer comment évolue l'énergie cinétique microscopique des pattes de l'ours.
2. L'énergie potentielle microscopique de l'iceberg est-elle modifiée lors de sa fonte?

7 Distinguer des variations d'énergie (1)

Mobiliser et organiser ses connaissances.

Une météorite se dirige vers la Terre à grande vitesse et pénètre dans l'atmosphère en s'échauffant et en fondant partiellement.



À cause des interactions avec les molécules de la haute atmosphère, elle atteint une vitesse limite.

1. Expliquer pourquoi l'énergie mécanique \mathcal{E}_m de la météorite diminue.
2. Justifier le fait que toutes les formes d'énergie de la météorite sont modifiées.

Donnée

Énergie potentielle de la météorite en interaction avec la Terre :
 $\mathcal{E}_p = -G \frac{m_{\text{météorite}} \times M_{\text{Terre}}}{r}$ avec $\mathcal{E}_p = 0$ si la distance r entre les deux corps est infinie.

8 Distinguer des variations d'énergie (2)

Rédiger une explication.

En pelote à main nue, lors d'un engagement, la balle en cuir appelée pelote s'échauffe.



- Relier le début et la fin des phrases.

L'énergie cinétique macroscopique de la pelote

est liée à son état physique.

L'énergie cinétique microscopique de la pelote

est liée à son altitude.

L'énergie potentielle macroscopique de la pelote

est liée à sa température.

L'énergie potentielle microscopique de la pelote

est liée à sa vitesse.

9 Reconnaître le mode de transfert de l'énergie (1)

Rédiger une explication.

Lors d'une descente, les skis sont soumis à des forces de frottement exercées par la piste.



1. Le transfert d'énergie de la piste sur le système {skis} s'effectue-t-il par travail ou par transfert thermique ?

2. Préciser le signe de ce transfert.

10 Reconnaître le mode de transfert de l'énergie (2)

Mobiliser et organiser ses connaissances.

Un glaçon, placé dans un verre d'eau, fond.

1. Schématiser la situation.

2. Sur le schéma, indiquer par des flèches le sens et le mode de transfert d'énergie (travail W ou transfert thermique Q) entre le système {glaçon} et l'eau.

3. Préciser le signe de ce transfert.

2 Le premier principe de la thermodynamique

VIDÉO DE COURS Du premier principe au bilan d'énergie – QR Code p. 64

11 Connaître le premier principe

Mobiliser et organiser ses connaissances.

Le premier principe, pour un système au repos macroscopique échangeant de l'énergie mais pas de matière avec l'extérieur et qui évolue d'un état initial à un état final, s'écrit : $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$.

1. Indiquer le nom et l'unité de chaque grandeur.

2. Préciser la convention qui détermine leur signe.

12 Énoncer le premier principe

Utiliser un vocabulaire scientifique adapté et rigoureux.

L'eau de la théière ci-contre est chauffée jusqu'à la température de 80 °C. On néglige tout échange par le bec verseur.



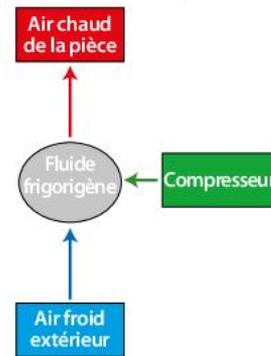
1. Identifier les transferts d'énergie entre le système {eau et théière} et le milieu extérieur.

2. Énoncer puis écrire le premier principe pour ce système.

13 Utiliser le premier principe (1)

Exploiter des informations.

Le fluide frigorigène d'une pompe à chaleur prend de l'énergie à l'air froid extérieur et en redonne à l'air de la pièce à chauffer. Pour cela, un compresseur transfère de l'énergie par travail mécanique au fluide frigorigène.



1. Reproduire le schéma ci-dessus et le compléter avec les trois transferts d'énergie ayant lieu entre le système {fluide frigorigène} et le milieu extérieur.

2. Écrire le premier principe pour ce système.

Utiliser le réflexe 1

14 Utiliser le premier principe (2)

Mobiliser et organiser ses connaissances.

Pour préparer un cocktail sans alcool, une barmaid mélange dans un shaker 35 cL de jus d'orange et 5 cL de jus de citron vert. On admettra que le shaker est un récipient hermétique qui n'échange pas d'énergie avec le milieu extérieur pendant la durée de préparation du cocktail.



Le shaker et le jus de citron sont à 20 °C initialement. Le jus d'orange est à 5 °C.

1. Écrire le premier principe pour le système {shaker, jus de citron vert et jus d'orange} entre le moment où les ingrédients sont introduits et la fin du mélange.

2. Le cocktail est versé dans un verre en terrasse où la température est égale à 30 °C. Identifier le corps duquel le cocktail reçoit de l'énergie par transfert thermique.

15 Prévoir l'évolution d'une énergie interne

CONSIG Mobiliser et organiser ses connaissances.

On souhaite refroidir de $5\text{ }^\circ\text{C}$ une masse m de jus de fruit considéré comme incompressible.

1. Donner l'expression de la variation d'énergie interne $\Delta U_{i \rightarrow f}$ du système {jus de fruit} en fonction notamment de la masse du système et de sa variation de température entre l'état initial et l'état final.
2. Prévoir le signe de la variation d'énergie interne de ce système.

Utiliser le réflexe 2

16 Calculer une variation d'énergie interne

Effectuer des calculs.

Pour préparer une soupe « miso » instantanée, on verse sur le contenu du sachet une masse m d'eau de 150 g initialement à la température $\theta_i = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Le système {eau} est considéré comme incompressible. On néglige l'influence du contenu du sachet. On chauffe l'eau pour l'amener à la température finale souhaitée θ_f .



1. Exprimer la variation d'énergie interne $\Delta U_{i \rightarrow f}$ de l'eau, en fonction notamment de sa masse et de sa variation de température entre l'état initial et l'état final.

2. La variation d'énergie interne $\Delta U_{i \rightarrow f}$ de l'eau à obtenir, pour que la température de l'eau atteigne la valeur finale souhaitée θ_f , est égale à $4,2 \times 10^4\text{ J}$. Calculer θ_f .

Donnée

Capacité thermique massique de l'eau :
 $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Exercices S'entraîner

17 Connaître les critères de réussite

Aluminium, toujours !

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs ; connaître les critères de réussite.



L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans l'écorce terrestre. Pour réaliser des bâtiments, il est utilisé en alliage avec du magnésium. L'alliage est composé de 90% en masse d'aluminium et 10% en masse de magnésium.

Pour améliorer sa résistance mécanique, une pièce d'alliage de masse $m = 10\text{ kg}$ subit une trempe thermique. Pour cela, elle est portée à haute température $\theta_1 = 540\text{ }^\circ\text{C}$, puis refroidie rapidement dans un bain d'eau de masse $m_{\text{eau}} = 1,00\text{ tonne}$ et de température initiale $\theta_2 = 19\text{ }^\circ\text{C}$.

Lors de la trempe thermique, il est nécessaire de prévoir l'élévation maximale de la température du bain. L'eau et l'alliage sont supposés incompressibles.

1. a. Quelle est la forme d'énergie du système 1 {pièce d'alliage} qui est modifiée lorsqu'il vient au contact de l'eau ?
 b. Exprimer la variation d'énergie interne ΔU_1 du système 1, puis celle ΔU_2 du système 2 {eau du bain} au cours de la trempe.
2. On néglige tout échange avec l'air ou la cuve contenant l'eau.
 a. Écrire le premier principe pour le système 1, puis pour le système 2.
 b. En déduire que $\Delta U_1 = -\Delta U_2$.

3. À l'aide des réponses précédentes, calculer la température finale du bain θ_f .

Données

- Capacité thermique massique de l'alliage $c_{\text{alliage}} = 909\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- Capacité thermique massique de l'eau $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Critères de réussite



- | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|
| J'ai respecté les notations de l'énoncé (questions 1 et 2. a.). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| J'ai exprimé les masses dans la même unité (question 3). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| J'ai effectué le calcul littéral puis l'application numérique (question 3). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| J'ai rédigé toutes les réponses. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

18 Il y a film et film...

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs.

Une alternative aux films plastiques alimentaires est le film à la cire d'abeille. Une couche fine de cire d'abeille, d'huile de jojoba et de résine de pin est déposée sur un tissu en coton biologique.



Pour fabriquer la couche de cire, on utilise une cuve en aluminium de masse $m_0 = 0,250$ kg, chauffée par un conducteur ohmique. La puissance électrique $\mathcal{P}_{\text{élec}}$ de l'appareil est 200 W. La cuve contient $m_1 = 100$ g de cire solide. L'ensemble est initialement à la température ambiante $\theta_a = 19$ °C.

La température de l'ensemble est maintenue constante une fois la fusion de la cire obtenue. Les pertes thermiques avec l'air ambiant sont négligées.

La cire est supposée incompressible.

1. a. Calculer la variation d'énergie interne ΔU_1 du système {cuve et cire} nécessaire pour atteindre la température de fusion de la cire.

b. Quelles formes d'énergie de la cire sont modifiées lors du chauffage ?

2. a. Rappeler le premier principe pour le système et en déduire le transfert thermique Q_1 à apporter au système par l'appareil pour atteindre la température de fusion.

b. Indiquer le signe de Q_1 .

c. Calculer la durée Δt_1 de chauffage nécessaire pour réaliser ce transfert thermique.

3. Il faut encore attendre une durée $\Delta t_2 = 6$ minutes pour que la cire fonde totalement. Calculer le transfert thermique Q_2 correspondant.

4. En déduire le transfert thermique Q_{tot} nécessaire à la fusion de 100 g de cette cire.

Données

- Température de fusion de la cire : $\theta_f = 64$ °C.
- Capacités thermiques massiques :
 - de l'aluminium : $c_{\text{Al(s)}} = 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$;
 - de la cire : $c_{\text{cire}} = 3,4 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

19 À chacun son rythme

Info ou intox ?

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs ; rédiger une explication.

Un ballon d'eau chaude contient un volume V d'eau de 80 L. Lors du premier remplissage, l'eau initialement à 17,0 °C est chauffée jusqu'à $\theta_f = 65,0$ °C. Les pertes thermiques sont négligées. L'eau est supposée incompressible.

A Extrait de la notice d'un chauffe-eau électrique

Emplacement	Vertical ou horizontal
Capacité	80 litres
Alimentation	230 V monophasé
Temps de chauffe réel à 50 °C	3 h 00
Classe énergétique	B
Puissance nominale	1 500 W



Énoncé compact

La durée de chauffe annoncée est-elle correcte ?

Énoncé détaillé

1. Calculer la variation d'énergie interne ΔU_1 du système {eau contenue dans le ballon}.

2. Rappeler le premier principe pour ce système, et en déduire le transfert thermique Q_1 apporté au système par le conducteur ohmique chauffant.

3. Exprimer le transfert thermique minimal Q_1 en fonction de la puissance électrique et de la durée de chauffe minimale Δt_1 . On rappelle que le conducteur ohmique restitue intégralement à l'eau, par transfert thermique, l'énergie qu'il reçoit par travail électrique.

4. Calculer Δt_1 .

5. La durée de chauffe annoncée est-elle correcte ?

Données

- Capacité thermique massique de l'eau : $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- Masse volumique de l'eau : $\rho_{\text{eau}} = 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

20 Résolution de problème

Pompe à chaleur

Construire les étapes d'une résolution de problème.

Un particulier souhaite acheter une pompe à chaleur (PAC) pour chauffer, en hiver, la pièce principale de son habitation de volume $V = 100 \text{ m}^3$, et passer d'une température $\theta_i = 15$ °C à une température de confort $\theta_f = 19$ °C.

On suppose que seul l'air de la pièce absorbe l'énergie transférée par la pompe à chaleur. Pour simplifier l'étude, on néglige toutes les pertes thermiques entre l'intérieur et l'extérieur de la pièce d'habitation.

A Pompe à chaleur (PAC)

Une PAC air/air est un système de chauffage qui effectue un transfert thermique Q depuis l'air l'extérieur de la maison vers l'air intérieur de la pièce d'habitation. Pour cela, elle comprend un compresseur qui consomme de l'énergie transférée par travail électrique $W_{\text{élec}}$.



B Coefficient de performance d'une PAC

Le COP, ou coefficient de performance, d'une pompe à chaleur quantifie son efficacité. Il représente le rapport entre le transfert thermique Q effectué et le travail électrique nécessaire.

C Extrait de la notice technique de la PAC étudiée

POMPE À CHALEUR AIR-AIR

- Température de fonctionnement : 9 °C mini – 35 °C maxi.
- Puissance consommée par la PAC en mode chauffage : $P_e = 750$ W.
- COP = 4.

• Pendant combien de temps le particulier devra-t-il faire fonctionner sa PAC pour obtenir la température de confort souhaitée dans sa pièce d'habitation ?

Données

- Capacité thermique massique de l'air : $c = 1,004 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- Masse volumique de l'air supposée constante : $\rho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

21 Musique !

Extraire et exploiter des informations ; effectuer des calculs.

On souhaite déterminer la capacité thermique massique c_2 d'un laiton.

A Laiton

Le laiton est un alliage de cuivre et de zinc, utilisé notamment pour fabriquer des instruments de musique.

Lors de cette fabrication, on recherche du laiton ayant un pourcentage massique de 80 % en cuivre et 20 % en zinc.



B Capacités thermiques

Pourcentage massique		Capacité thermique massique du laiton ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
en cuivre	en zinc	
90	10	386
80	20	388
70	30	390

C Calorimètre

Un calorimètre est une enceinte dans laquelle il n'y a pas de transfert thermique Q entre l'extérieur et l'intérieur. À l'intérieur du calorimètre, $\Sigma Q = 0$ J.



Le laiton, le calorimètre et l'eau liquide sont incompressibles. Les pertes thermiques sont négligées.

On dispose d'un calorimètre de capacité thermique $C = 225 J \cdot ^\circ C^{-1}$ et contenant une masse d'eau $m_1 = 300$ g. L'ensemble est à la température $\theta_1 = 18,0$ °C.

L'échantillon de laiton de masse $m_2 = 100$ g est placé dans une étuve à une température fixée $\theta_2 = 92,0$ °C.

On le plonge ensuite rapidement dans le calorimètre et l'eau. La température finale de l'ensemble est $\theta_f = 19,9$ °C.

1. Schématiser la situation initiale et indiquer, à l'aide de flèches, le sens des transferts thermiques entre le sous-système 1 {calorimètre et eau} et le sous-système 2 {laiton}.

2. Calculer la variation ΔU_1 du sous-système 1.

3. Exprimer la variation ΔU_2 du sous-système 2.

4. a. Montrer que $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$ J.

b. À l'aide des réponses précédentes, exprimer puis calculer la capacité thermique massique c_2 du laiton.

5. a. Cet échantillon de laiton est-il utilisable pour la fabrication d'un instrument de musique ?

b. Le pronostic émis à l'issue de cette expérience est-il sûr ?

Donnée

Capacité thermique massique de l'eau : $c_{eau} = 4,18 \times 10^3 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

22 First law of thermodynamics

Pratiquer une langue vivante étrangère.

Around 1850 Rudolf Clausius and William Thomson (Kelvin) stated both the **First Law of thermodynamics**.

This law is the conservation-of-energy principle stated for a system where heat and work are the methods of transferring energy for this system in thermal equilibrium. (Source : Wikipedia)

1. Write First Law of thermodynamics.
2. Give the sign's conventions in this law.

23 Aluminothermie et soudure de rails

Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs.

L'aluminothermie est un procédé de soudage utilisé pour les rails en acier de chemin de fer, par réaction chimique dans un creuset $Fe_2O_3(s) + 2 Al(s) \rightarrow Al_2O_3(s) + 2 Fe(s)$ et par coulée d'un métal en fusion.



Au cours d'un soudage, on place dans le creuset un mélange de poudre d'oxyde ferrique et d'aluminium de masse $m = 1,0$ kg et de capacité thermique massique $c = 712 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$, à la température ambiante $\theta_a = 20$ °C. La réaction est amorcée à l'aide d'une poudre d'allumage et se produit lorsque le mélange atteint, $\theta_c = 1\ 200$ °C.

L'énergie libérée par la réaction chimique qui se produit alors, pour un gramme de mélange dans les proportions de l'équation de la réaction, est $\mathcal{E}_{lib} = 3,9$ kJ · g⁻¹.

Les pertes thermiques sont négligées.

1. Calculer la variation d'énergie interne ΔU_1 du système {mélange de poudres d'oxyde ferrique et d'aluminium} entre l'état initial et l'état final lorsque la réaction chimique peut être amorcée.

2. a. Rappeler alors le premier principe appliqué au système.

b. En déduire l'énergie apportée Q_1 lors de l'amorce avec la poudre d'allumage.

3. Calculer l'énergie libérée Q_2 par la réaction chimique entre les poudres dans le creuset.

4. a. Comparer l'énergie apportée Q_1 et l'énergie libérée Q_2 .

b. La température dans le creuset peut atteindre 2 800 °C. Justifier que le soudage puisse alors s'effectuer par coulée de métal dans le moule situé entre les deux rails.

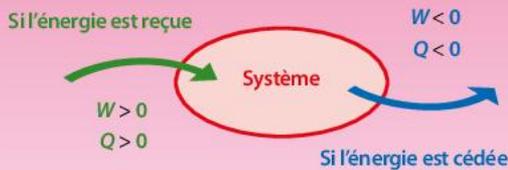
Données

- Température de fusion de l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 $\theta_{fus, Al_2O_3} = 2,05 \times 10^3$ °C.
- Température de fusion du fer $\theta_{fus, Fe} = 1,54 \times 10^3$ °C.
- Température de fusion de l'acier (composé de fer et de moins de 2% de carbone) $\theta_{fus, acier} = 1,40 \times 10^3$ °C.

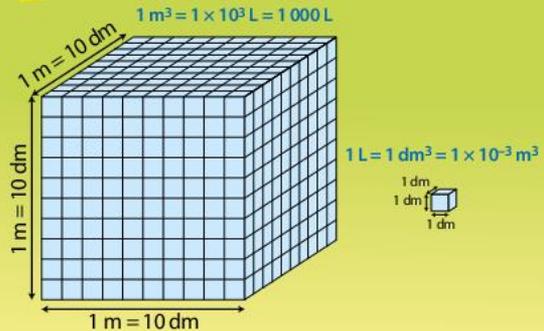
Bien choisir les unités dans les applications numériques

NON	OUI
bar (bar)	pascal (Pa)
litre (L)	mètre cube (m^3)

Faire attention aux signes lors des transferts d'énergie !



Bien convertir les unités de volume



Préparation à l'écrit

→ Les bons réflexes 1 et 2 sont présentés p. 66

24
CORREGE 30 min

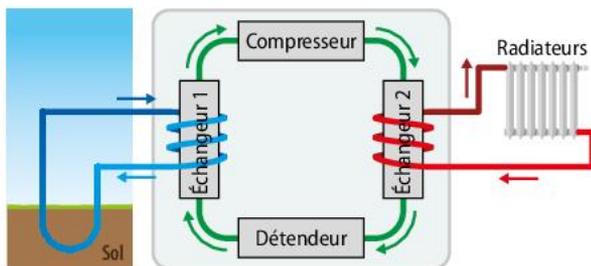
Géothermie

Faire un schéma adapté ; mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique et argumenter.

A Fonctionnement d'une Pompe À Chaleur géothermique

Une PAC géothermique est un système de chauffage qui capte, sous forme d'un transfert thermique Q_1 , de « l'énergie géothermique » par prélèvement depuis un réseau enfoui dans le sol, pour en céder une quantité Q_2 au circuit d'eau alimentant les radiateurs du logement. Elle comprend :

- un détendeur qui ne consomme pas d'énergie ;
- un compresseur qui consomme de l'énergie électrique W_{elec} et qui permet à un fluide spécifique de récupérer Q_1 à travers un premier échangeur et de restituer Q_2 à travers un second échangeur.



- Circuit d'eau du réseau de captage dans le sol
- Circuit du fluide spécifique dans la PAC
- Circuit d'eau alimentant les radiateurs

B Consommation de la PAC

Une pompe à chaleur géothermique fonctionne pendant 4 h sur une journée pour élever la température de l'eau des radiateurs d'une maison de $\theta_i = 12^\circ C$ à $\theta_f = 20^\circ C$. Le débit massique D_m de l'eau dans les radiateurs est de $145 kg \cdot h^{-1}$. Pendant la durée du chauffage, le transfert d'énergie électrique vers le moteur du compresseur est de $4,82 \times 10^6 J$.

- Schématiser les différents transferts d'énergie entre le système {fluide spécifique} et le milieu extérieur au cours du fonctionnement de la PAC.
- Calculer la variation d'énergie interne ΔU_2 de l'eau des radiateurs lorsque sa température évolue. **Utiliser le réflexe 2**
 - En déduire le transfert thermique Q_2 entre le système {fluide spécifique} et l'eau des radiateurs.
- Le fluide spécifique effectue des cycles dans la PAC. Au cours d'un cycle, les énergies mécanique et interne du système ne varient pas.
 - Écrire le premier principe pour le système {fluide spécifique}. **Utiliser le réflexe 1**
 - En déduire le transfert thermique Q_1 .
- Calculer le rapport entre l'énergie utile donnée par la PAC à l'eau des radiateurs et l'énergie facturée qu'elle consomme.

Donnée

Capacité thermique massique de l'eau :
 $c_{eau} = 4,18 \times 10^3 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

Étude d'un dispositif de chauffe

Extraire et organiser l'information ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique.

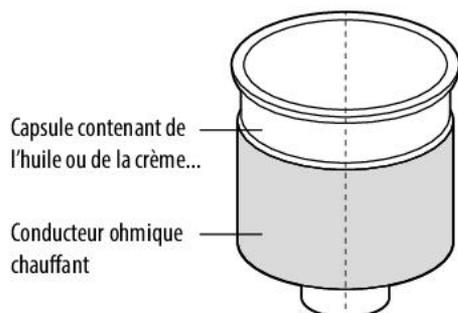
D'après Bac Polynésie 2019 SSI

Pour fabriquer un cosmétique sur mesure, il est nécessaire de chauffer une crème encapsulée à la température initiale $\theta_i = 20\text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'à la température $\theta_f = 75\text{ }^\circ\text{C}$ au cœur de la capsule.

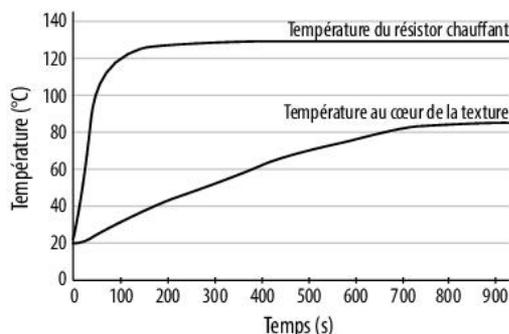
Une start-up cherche à développer un dispositif de chauffe adapté qui utilise un conducteur ohmique chauffant ou résistor chauffant d'une puissance $\mathcal{P}_{\text{elec}} = 15\text{ W}$ et entourant la crème encapsulée (schéma **A**).

Le contrôle de la température de chauffe est réalisé par mesure de la durée du chauffage, celle-ci ne dépendant que du type de contenu encapsulé. Il n'est pas prévu de dispositif de mesure de température.

A Dispositif de chauffe



B Évolution des températures



Les pertes thermiques sont négligées.
La crème est considérée comme un fluide incompressible.

1. a. La masse de l'enveloppe de la capsule est négligeable devant la masse de la crème encapsulée.

Donner l'expression de la variation d'énergie interne ΔU_1 du système {crème encapsulée} nécessaire pour le chauffer à la température souhaitée, en fonction de la capacité thermique massique c , de la masse volumique ρ et de la variation de température $\Delta\theta$.

b. Quelles formes d'énergie de la crème sont modifiées lors du chauffage ?

2. Calculer la durée Δt_1 du chauffage nécessaire pour que le système {crème encapsulée} atteigne la température θ_f grâce au dispositif de chauffe.

Coup de pouce QR Code p. 64

3. Afin de valider cette valeur calculée Δt_1 de la durée du chauffage correspondant à la température θ_f , les températures du conducteur ohmique chauffant et du cœur de la capsule ont été relevées simultanément au cours du temps.

Les résultats de l'expérience sont présentés sur le graphique **B**.

Déterminer la durée de chauffage expérimentale $\Delta t_{1,\text{exp}}$ nécessaire pour que la texture atteigne la température θ_f .

4. Justifier l'écart entre les durées de chauffage mesurée et calculée permettant d'obtenir une température au cœur de la texture de $75\text{ }^\circ\text{C}$.

5. Le cahier des charges lors du chauffage de la crème indique que la durée maximale ne doit pas dépasser 7 minutes.

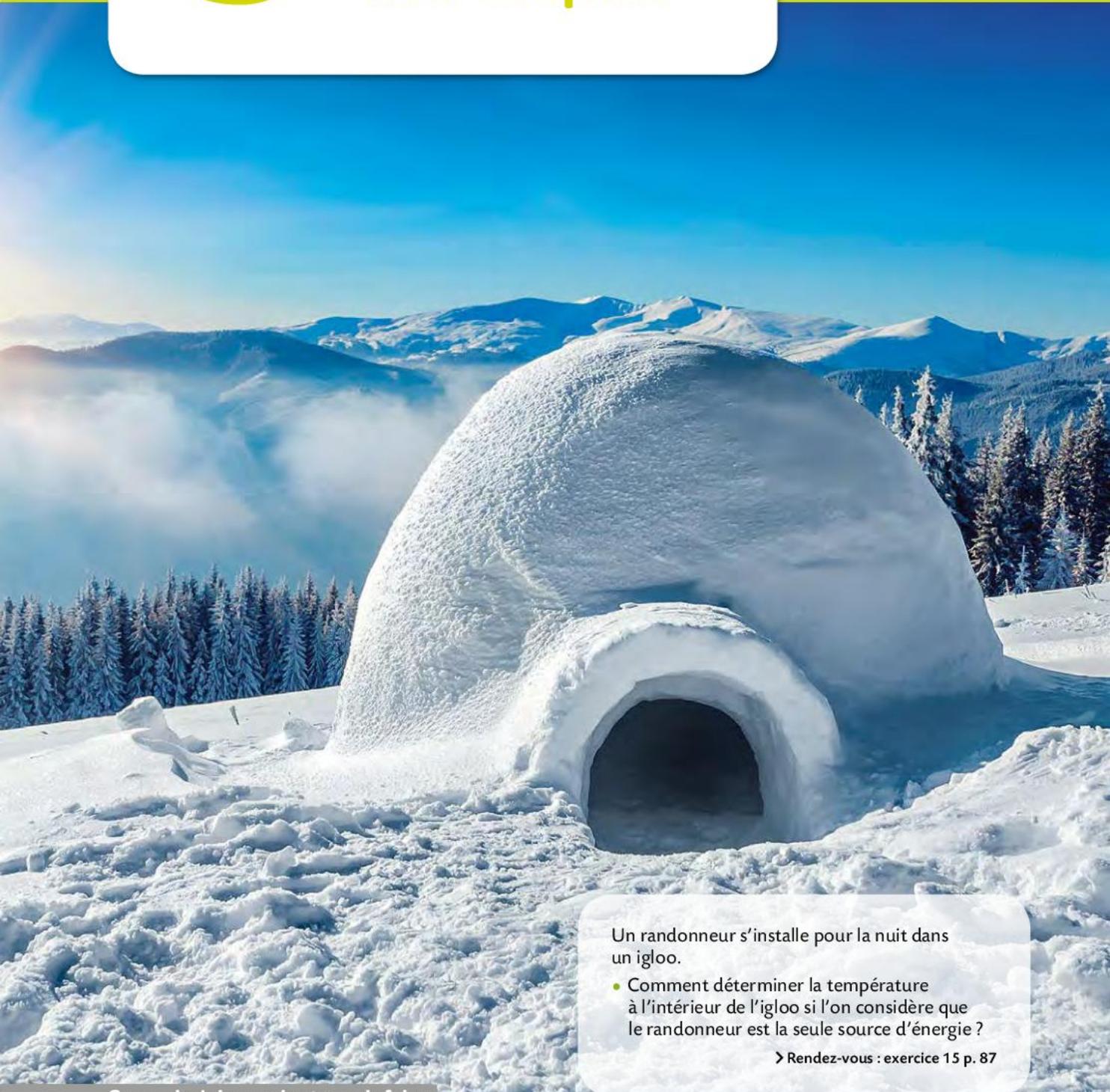
La start-up peut-elle conserver ce dispositif de chauffage en l'état ?

Données

- Volume de la capsule : $V = 12,5\text{ mL}$;
- Masse volumique de la crème : $\rho = 1\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- Capacité calorifique massique du système {crème encapsulée} : $C = 1\,400\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

5

Transferts thermiques



Un randonneur s'installe pour la nuit dans un igloo.

- Comment déterminer la température à l'intérieur de l'igloo si l'on considère que le randonneur est la seule source d'énergie ?

➤ Rendez-vous : exercice 15 p. 87

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Décrire qualitativement les trois modes de transfert thermique : convection, conduction, rayonnement. Exercice 2 p. 84
- Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée. Activité 1 p. 76
- 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. Exercice 8 p. 84

- Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible. Activité 2 p. 77
- **Capacité mathématique** : résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant. Exercice 10 p. 85

Activité 1 expérimentale

Résistance thermique de conduction d'un matériau

Notions

- Flux thermique
- Résistance thermique

Un bouclier en matériau composite PICA a protégé la sonde Mars Science Laboratory lors de la plus rapide rentrée atmosphérique de l'histoire d'une sonde spatiale. Pouvant supporter des températures de 2 000 °C, ce bouclier est constitué de « briques élémentaires ». Il pourrait presque être tenu sans se brûler par la face opposée à celle chauffée à plus de 1 000 °C.



Tâche complexe

► **Objectif de l'activité :** Comment déterminer, à partir du flux thermique, la résistance thermique d'un matériau lors d'un transfert thermique par conduction ?

A Dispositif expérimental pour la mesure d'une résistance thermique de conduction

L'échantillon à tester est positionné entre les deux plaques d'aluminium d'un appareil de mesure de résistance thermique.

Une des plaques est maintenue à la température ambiante θ_1 par une source chaude.

L'autre plaque est maintenue à la température $\theta_2 = \theta_1 - 10$ °C par une source froide.

On maintient cette différence de température $\Delta\theta = 10$ °C entre les deux faces du matériau jusqu'à ce que le flux thermique qui le traverse devienne constant.

L'appareil affiche alors le flux thermique Φ et la résistance thermique R_{th} du matériau.

COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

• Flux thermique Φ

Si le transfert thermique Q entre un système et le milieu extérieur a pour durée Δt , le flux thermique Φ traversant ce système a pour expression :

$$\Phi \text{ en W} \rightarrow \Phi = \frac{Q}{\Delta t} \left\{ \begin{array}{l} Q \text{ en J} \\ \Delta t \text{ en s} \end{array} \right.$$

• Résistance thermique R_{th}

La résistance thermique R_{th} caractérise l'opposition d'un milieu au transfert thermique entre deux points A et B.

En régime permanent indépendant du temps, le flux thermique Φ orienté du point A vers le point B, la différence de température $\theta_A - \theta_B$ entre ces points et la résistance thermique R_{th} du (ou des) milieu(x) traversé(s) sont liés par :

$$R_{th} \text{ en } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \rightarrow R_{th} = \frac{\theta_A - \theta_B}{\Phi} \left\{ \begin{array}{l} \theta \text{ en } ^\circ\text{C} \\ \Phi \text{ en W} \end{array} \right.$$

MATÉRIEL DISPONIBLE



Étapes de la démarche d'investigation

1. RELIRE les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter.
2. REFORMULER le problème en utilisant un vocabulaire scientifique.
3. ÉMETTRE une hypothèse permettant d'y répondre.
4. ÉLABORER un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée.
5. NOTER les observations, les interpréter et conclure.

Investigation

APP · ANA-RAIS · RÉA · VAL · COM

- 1 Identifier les paramètres ayant une influence sur l'efficacité d'un bouclier thermique.

Utiliser un modèle pour expliquer RÉA

- 2 Expliquer pourquoi il serait quasiment possible de tenir la face d'une brique de bouclier thermique, dont l'autre face a été chauffée à 1 200 °C, sans se brûler.

Un pas vers le cours

Rendre compte à l'écrit en utilisant un vocabulaire adapté COM

- 3 Comment déterminer, à partir du flux thermique, la résistance thermique d'un matériau lors d'un transfert thermique par conduction ?

Activité 2 expérimentale

Température d'un système incompressible au cours du temps

Notion

Modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat

La température idéale d'extraction pour la réalisation d'un café expresso est 85 °C. Les experts conseillent une dégustation du café à 65 °C. L'abaissement de la température entre l'extraction et la dégustation est lié aux transferts thermiques convectifs entre le café dans la tasse et le milieu extérieur.

► **Objectif de l'activité :** Quelle fonction mathématique modélise l'évolution de la température d'un système incompressible en fonction du temps ?



COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

- Un système incompressible à la température θ effectue un transfert thermique par convection avec un milieu extérieur de température constante θ_e . Le système ou le milieu extérieur est un fluide.
- La dérivée de la température de ce système par rapport au temps, notée $\frac{d\theta}{dt}$, est proportionnelle à la différence de température entre le système et le milieu extérieur :

$$\frac{d\theta}{dt} = a \times (\theta - \theta_e)$$

Annotations : θ en °C, t en s, a en s⁻¹.

Dans cette relation, a est une constante négative relative au système et au milieu extérieur, qui dépend de leur surface de contact S.

MATÉRIEL DISPONIBLE



Pratique expérimentale

On admet que la température est uniforme en chaque point du système étudié et que le transfert thermique par rayonnement entre le système et le milieu extérieur est négligeable.

Élaborer et mettre en œuvre un protocole ANA-RAIS-REA

- 1 Proposer et mettre en œuvre un protocole pour suivre l'évolution de la température du système {eau et bécber}.

Tracer un graphique REA

- 2 Tracer le graphique de l'évolution de la température θ du système en fonction du temps t .

Exploiter des résultats ANA-RAIS

- 3 a. Utiliser les outils du logiciel tableur-grapheur pour vérifier que l'équation de la courbe tracée à la question 2 peut être modélisée par la fonction :

$$\theta = (\theta_1 - \theta_e) \times e^{a \times t} + \theta_e$$
 avec θ_1 la température initiale du système.

Discuter un modèle VAL

- b. Vérifier que la relation $\theta = (\theta_1 - \theta_e) \times e^{a \times t} + \theta_e$ est la solution de l'équation différentielle :

$$\frac{d\theta}{dt} = a \times \theta - a \times \theta_e$$

Effectuer des calculs REA

- 4 Pour le système incompressible {café et tasse}, la constante a est égale à $-0,20 \text{ min}^{-1}$ et on néglige les échanges de matière entre ce système et le milieu extérieur. Estimer la durée idéale au bout de laquelle un café peut être dégusté si la température de l'air environnant est constante et égale à 25 °C.

Un pas vers le cours

Rendre compte à l'écrit en utilisant un vocabulaire adapté COM

- 5 Quelle fonction mathématique modélise l'évolution de la température d'un système incompressible en fonction du temps ?

A Modes de transfert thermique



> Conduction thermique entre la casserole et le système {cuisinier}.



> Convection thermique entre l'air chauffé par les braises et le système {cuisinier}.



> Rayonnement thermique entre les lampes infrarouges et le système {plat}.

CONVENTION

La température $T(t)$ ou $\theta(t)$ sera notée T ou θ afin d'alléger les notations.

lycee.hachette-education.com/physique-si/tle



VIDÉO DE COURS

1 Le transfert thermique

Un transfert thermique s'effectue entre un système et le milieu extérieur lorsqu'il existe une **différence de température** entre eux.

Dans les situations étudiées, le régime est considéré comme permanent indépendant du temps (régime permanent stationnaire).

a. Modes de transfert thermique

- Trois modes de transfert thermique peuvent avoir lieu (dessins A).

Conduction thermique	Elle se produit principalement dans les solides . L'agitation thermique se transmet de proche en proche dans la matière, sans déplacement d'ensemble de celle-ci.
Convection thermique	Elle se produit dans les fluides . L'agitation thermique se transmet de proche en proche dans le fluide, avec déplacement d'ensemble de celui-ci : des courants de fluide circulent.
Rayonnement thermique	Il se produit dans tout milieu matériel ou dans le vide . L'absorption et l'émission d' ondes électromagnétiques par la matière en modifient l'agitation thermique.

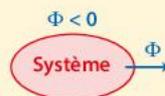
b. Flux thermique

Si le transfert thermique Q entre un système et l'extérieur a pour durée Δt , alors le flux thermique noté Φ est défini par :

$$\Phi \text{ en W} \rightarrow \Phi = \frac{Q}{\Delta t} \left\{ \begin{array}{l} Q \text{ en J} \\ \Delta t \text{ en s} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \Phi > 0 \\ \text{Système} \end{array}$$

Par convention, le flux thermique est compté :

- **positivement** s'il est **reçu** par le système ;
- **négativement** s'il est **cédé** par le système.



Le flux thermique Φ est aussi appelé puissance thermique, notée \mathcal{P}_{th} .

c. Résistance thermique

La résistance thermique R_{th} caractérise l'opposition d'un milieu au transfert thermique entre deux points.

Exemple : Le cuisinier du dessin A peut tenir la casserole métallique chaude, sans se brûler, à l'aide d'un torchon. Le tissu du torchon s'oppose au transfert thermique de la casserole vers la main, d'autant plus efficacement que son épaisseur est grande.

Le flux thermique Φ orienté d'un point A vers un point B, la différence de température $T_A - T_B = \theta_A - \theta_B$ entre ces points et la résistance thermique R_{th} du (ou des) milieu(x) traversé(s) sont liés par :

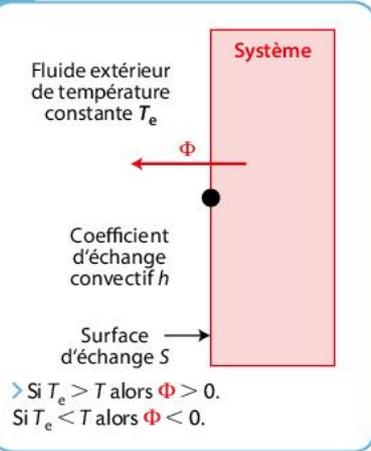
$$\Phi \text{ en W} \rightarrow \Phi = \frac{T_A - T_B}{R_{th}} = \frac{\theta_A - \theta_B}{R_{th}} \quad \begin{array}{l} T \text{ en K} \\ \theta \text{ en } ^\circ\text{C} \\ R_{th} \text{ en K} \cdot \text{W}^{-1} \\ R_{th} \text{ en } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \end{array}$$

2 La loi de Newton

a. Modèle de la loi de Newton

- Considérons un système incompressible en contact avec le milieu extérieur sans échange de matière, le système ou le milieu extérieur étant fluide.

B Fluide en contact avec une paroi



Lorsque le principal mode de transfert thermique est la **convection** dans le fluide, la **loi de Newton** modélise le flux thermique Φ à partir d'observations expérimentales. Elle relie le flux thermique convectif Φ et la différence de température $T_e - T = \theta_e - \theta$ entre :

- le système dont la surface d'échange S avec le milieu extérieur a pour température T supposée uniforme ;
- le milieu extérieur de température T_e constante, appelé **thermostat**.

- Cette loi, avec les notations du schéma B, s'écrit :

$$\Phi \text{ en W} = h \text{ en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \text{ ou } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \times S \text{ en } \text{m}^2 \times (T_e - T) \text{ en K} = h \times S \times (\theta_e - \theta) \text{ en } \text{°C}$$

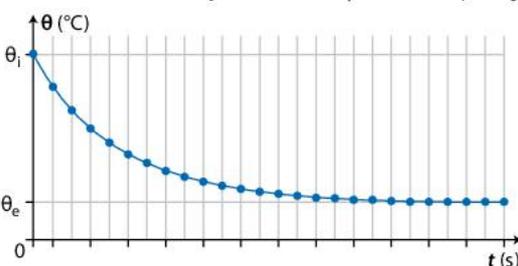
b. Bilan d'énergie d'un système incompressible

- Le système incompressible étudié à la température θ échange de l'énergie **uniquement par transfert thermique convectif** avec le thermostat ou milieu extérieur à la température θ_e constante, l'un des deux étant fluide.
- Ce système est au repos sans échange de matière avec l'extérieur.

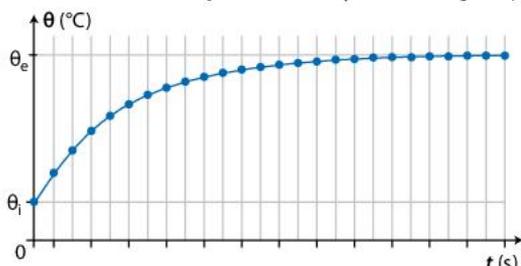
Établissement de l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système	Détermination de la solution de l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système
<ul style="list-style-type: none"> • D'après le premier principe de la thermodynamique, entre un état initial i et un état final f : $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ • Or pour une durée Δt suffisamment courte : $Q = \Phi \times \Delta t$ • De plus, d'après la loi de Newton, $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$ d'où : $Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t$ • On a également, pour un système incompressible de masse m dont la variation de température est $\Delta \theta$: $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta$avec c la capacité thermique massique du système. • La relation devient $m \times c \times \Delta \theta = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t$ soit : $\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta)$ • Lorsque Δt tend vers zéro, la limite de $\left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t}\right)$ est égale à la dérivée de θ par rapport au temps t notée $\frac{d\theta}{dt}$. Il vient : $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$C'est l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système. 	<p>En mathématiques, les solutions d'une équation $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K une constante d'intégration réelle.</p> <p>Pour résoudre l'équation différentielle, il faut remplacer la fonction y par θ, la variable x par le temps t, la constante a par $-\frac{h \times S}{m \times c}$ et la constante b par $\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les solutions de l'équation différentielle sont de la forme : $\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$ • Pour déterminer la constante K, il faut utiliser les conditions initiales sur la température. À $t = 0$ s, la température du système est $\theta = \theta_i$ donc : $\theta_i = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times 0} + \theta_e$Or $e^0 = 1$, ce qui conduit à : $K = \theta_i - \theta_e$. • La solution de l'équation différentielle est donc : $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$avec $a = -\frac{h \times S}{m \times c}$ $\tau = -\frac{1}{a}$ est appelé temps caractéristique de l'évolution de la température du système, exprimé en seconde.

Allure de la courbe donnant la température d'un système en contact avec un thermostat, en fonction du temps

Refroidissement du système incompressible : $\theta_i > \theta_e$



Réchauffement du système incompressible : $\theta_e > \theta_i$





▶ VIDÉO DE COURS
▶ Loi de Newton
▶ QCM
▶ Version interactive

1 Le transfert thermique

	Modes de transfert thermique		
	Conduction	Convection	Rayonnement
Milieu(x)	Surtout les solides	Surtout les fluides	Tous, y compris le vide
Transfert	De proche en proche	Via des courants de fluide	Via l'émission, l'absorption de photons

Flux Φ ou puissance \mathcal{P}_{th} thermique

$$\Phi = \mathcal{P}_{th} = \frac{Q}{\Delta t}$$

Φ et \mathcal{P}_{th} en W
 Q en J
 Δt en s

Résistance thermique R_{th}

Positive, elle caractérise l'opposition d'un milieu au transfert thermique entre deux points A et B respectivement à la température T_A (ou θ_A) et T_B (ou θ_B).

$$\Phi = \frac{T_A - T_B}{R_{th}} = \frac{\theta_A - \theta_B}{R_{th}}$$

Φ en W
 T en K
 θ en $^{\circ}\text{C}$
 R_{th} en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
 R_{th} en $^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$

2 La loi de Newton

Évolution de la température θ (ou T) d'un système incompressible en fonction du temps

Le système incompressible échange uniquement par transfert thermique convectif Q avec un milieu extérieur de température constante (thermostat), le système ou le milieu extérieur étant fluide.

Établissement de l'équation différentielle

Application du premier principe de la thermodynamique $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ \rightarrow Utilisation de la relation entre Q et le flux thermique Φ associé à ce transfert convectif \rightarrow Utilisation de l'expression de Φ donnée par la loi de Newton fournie \rightarrow Expression de $\Delta U_{i \rightarrow f}$ en fonction des températures initiale et finale \rightarrow Expression de $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$, puis lorsque Δt tend vers zéro, identification de $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ à $\frac{d\theta}{dt}$

Résolution de l'équation différentielle

Présentation de l'équation différentielle sous la forme : $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) \rightarrow Rappel de la forme des solutions de l'équation différentielle \rightarrow Utilisation des conditions initiales pour trouver la constante d'intégration

QCM

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s), puis vérifier la correction p. 147.

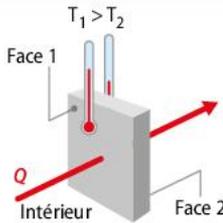
A

B

C

1 Le transfert thermique

Si erreur, revoir § 1 p. 78

1. Dans un fluide, le transfert thermique a lieu principalement par :	convection.	conduction.	travail.
2. Dans la situation suivante, les joueurs de rugby échangent de l'énergie thermique avec l'air environnant principalement par : 	convection.	rayonnement.	conduction.
3. Les trois modes de transfert thermique entre un système et le milieu extérieur :	peuvent avoir lieu simultanément.	nécessitent tous un milieu matériel.	contribuent à la variation d'énergie interne du système.
4. Q étant le transfert thermique échangé par le système (air intérieur), le flux thermique Φ est : 	négatif.	positif.	nul.
5. Le flux thermique à travers une paroi plane :	est l'énergie transférée à travers la paroi.	correspond à un transfert d'énergie de la source chaude vers la source froide.	est l'énergie transférée à travers la paroi par unité de temps.
6. Plus la résistance thermique R_{th} du matériau constituant la cloison de la question 4 est grande :	plus la cloison favorise le transfert thermique.	plus le flux thermique traversant la cloison est petit, $(T_2 - T_1)$ étant fixé.	plus le flux thermique traversant la cloison est grand, $(T_2 - T_1)$ étant fixé.

2 La loi de Newton

Si erreur, revoir § 2 p. 78

7. La loi de Newton s'écrit $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$ avec h le coefficient d'échange convectif et S la surface d'échange entre le système à la température θ et l'extérieur à la température θ_e . Elle s'applique pour :	la convection entre un système incompressible et le milieu extérieur, l'un des deux étant fluide.	la conduction entre un système incompressible et le milieu extérieur, l'un des deux étant fluide.	tous les transferts thermiques entre un système incompressible et le milieu extérieur, l'un des deux étant fluide.
8. Dans la loi de Newton rappelée question 7, le flux convectif est :	reçu par le système si $\theta > \theta_e$.	proportionnel à θ .	cédé par le système si $\theta > \theta_e$.
9. Le coefficient d'échange convectif h s'exprime en :	$K \cdot W^{-1} \cdot m^{-2}$	$W \cdot K^{-1} \cdot m^2$	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$
10. L'équation différentielle $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$ a pour solutions :	$\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} - \theta_e$	$\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$	$\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t}$

 QCM version interactive

Si l'énoncé demande de...

Il est nécessaire de...

Établir l'équation différentielle vérifiée par la température θ (ou T) d'un système au contact d'un thermostat.

Réflexe 1

- **Rappeler** le premier principe de la thermodynamique.
- **Utiliser** la définition du flux thermique supposé constant pour exprimer le transfert thermique Q pendant un intervalle de temps Δt .
- **Utiliser** la loi de Newton fournie pour exprimer le flux thermique Φ convectif transféré du système vers le milieu extérieur (ou thermostat) puis Q pendant Δt .
- **Exprimer** la variation d'énergie interne $\Delta U_{i \rightarrow f}$ du système incompressible dont la température varie.
- **Exprimer** $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ puis, lorsque Δt tend vers zéro, identifier $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ à $\frac{d\theta}{dt}$ afin d'établir une relation en fonction de θ (ou T).

Ex. 8 p. 84

Résoudre l'équation différentielle vérifiée par la température θ (ou T) d'un système au contact d'un thermostat.

Réflexe 2

- **Écrire** l'équation différentielle vérifiée par la température sous la forme : $\frac{d\theta}{dt} = a \times \theta + b$ (ou $\frac{dT}{dt} = a \times T + b$).
- **Rappeler** la forme générale des solutions de l'équation différentielle.
- **Utiliser** les conditions initiales pour déterminer la constante d'intégration de la solution.

Ex. 10 p. 85

1 Exercice résolu

La gourde du randonneur : du passé au présent

| Exploiter des informations ; effectuer des calculs ; discuter un modèle.

Avant l'arrivée des bouteilles isothermes en acier, les gourdes étaient souvent de simples bouteilles en aluminium anodisé. Un randonneur remplit une telle gourde, de masse $m_1 = 172$ g, d'une boisson chaude de masse $m_2 = 750$ g à la température $\theta_i = 50$ °C. La température de l'air extérieur est $\theta_e = 5$ °C, supposée constante : l'air extérieur est un thermostat. On considère le système {boisson et gourde} comme un système incompressible de température uniforme, de surface $S = 4,0 \times 10^{-2}$ m². Par conduction thermique, la surface externe de la gourde atteint très rapidement la température initiale de la boisson sans prélèvement d'énergie.



1. Identifier le fluide qui échange de l'énergie par convection avec le système, puis effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour ce système.
2. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système.
3. Résoudre cette équation différentielle et montrer que l'évolution de la température au cours du temps est donnée par la relation : $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{(m_1 + m_2) \times c} \times t} + \theta_e$, avec t en seconde et θ en degré Celsius
4. En ne considérant que le seul transfert thermique par convection, calculer la température de la boisson dans la bouteille au bout de 2 heures, le flux étant supposé constant. Conclure.
5. Les gourdes isothermes actuelles, en acier, peuvent désormais maintenir les boissons chaudes pendant 12 heures dans des conditions hivernales. Ce type de gourde comporte une double enveloppe d'acier comprenant une épaisseur vide d'air. Expliquer pourquoi il est possible de maintenir ainsi la température d'une boisson chaude au cours d'une durée si importante.

Données

- Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$ avec Φ le flux convectif entre le milieu extérieur et le système, et h le coefficient d'échange convectif dans l'air ($h = 10$ W · m⁻² · °C⁻¹).
- Capacité thermique massique du système étudié : $c = 3,6 \times 10^3$ J · kg⁻¹ · °C⁻¹.
- On néglige tout transfert thermique autre que convectif.

Solution rédigée

- On utilise le Réflexe 1.

Rappel du premier principe de la thermodynamique

1. L'air extérieur est le fluide qui échange avec le système {boisson et gourde} supposé incompressible et au repos macroscopique. Le système est dans l'état initial à 50 °C, dans l'état final à la température θ .

Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique Q , car $W = 0$ J.

D'après le premier principe de la thermodynamique, $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$, donc :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$$

Définition du flux thermique pour exprimer le transfert thermique Q

Utilisation de la loi de Newton pour exprimer Φ puis Q pendant Δt

Expression de la variation d'énergie interne $\Delta U_{i \rightarrow f}$ d'un système incompressible

Expression de $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ puis identification de $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ à $\frac{d\theta}{dt}$

On utilise le Réflexe 2.

Écriture de l'équation différentielle sous la forme $\frac{d\theta}{dt} = a \times \theta + b$

Rappel de la forme générale des solutions de l'équation différentielle

Utilisation des conditions initiales pour déterminer la constante d'intégration

2. Puisque Φ est constant pour un intervalle de temps Δt court : $Q = \Phi \times \Delta t$.

De plus, d'après la loi de Newton, $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$, d'où :

$$Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t$$

Pour le système incompressible, $\Delta U_{i \rightarrow f} = (m_1 + m_2) \times c \times \Delta \theta$ et $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$.

Soit $\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{(m_1 + m_2) \times c} \times (\theta_e - \theta)$; lorsque Δt tend vers zéro, la limite de $\left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t}\right)$ est égale à la dérivée de θ par rapport au temps t notée $\frac{d\theta}{dt}$.

Ceci s'écrit : $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{(m_1 + m_2) \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{(m_1 + m_2) \times c} \times \theta_e$.

C'est l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système.

3. Les solutions générales de l'équation différentielle $y' = ay + b$ ont pour forme : $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K un réel et $a \neq 0$.

Ici, les solutions sont donc de la forme $\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{(m_1 + m_2) \times c} \times t} + \theta_e$.

Initialement, $\theta(0) = \theta_i$; d'après la solution, $\theta(0) = K + \theta_e$.

On en déduit : $K = \theta_i - \theta_e = 50 - 5 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

De plus, $\frac{h \times S}{(m_1 + m_2) \times c} = \frac{10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 4,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2}{0,922 \text{ kg} \times 3,6 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}$
 soit $1,2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

L'unique solution de l'équation vérifiant $\theta(0) = \theta_i = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ est donc :
 $\theta = 45 \times e^{-1,2 \times 10^{-4} t} + 5$ avec θ en degré Celsius et t en seconde.

4. Au bout de 2 heures, $\theta = 45 \text{ }^\circ\text{C} \times e^{-1,2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \times 2 \times 3600 \text{ s}} + 5 \text{ }^\circ\text{C}$ soit $\theta = 24 \text{ }^\circ\text{C}$; la température du système a diminué de $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Cette gourde n'a pas l'efficacité recherchée par le randonneur.

5. Une double enveloppe d'acier comprenant du vide empêche pratiquement les transferts thermiques par conduction ou rayonnement de la gourde. La température de la boisson reste constante pendant une durée importante.

Côté maths 3 : Résoudre une équation différentielle de second membre constant et non nul

Côté maths

Résoudre sur \mathbb{R} l'équation différentielle suivante :
 $y' = -4y + 8$ avec la condition $y(0) = 4$.

Méthode

Pour une équation différentielle $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$), les solutions sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec $K \in \mathbb{R}$.

Les solutions de cette équation sont donc :

$$y = K \times e^{-4x} - \frac{8}{(-4)} = K \times e^{-4x} + 2 \text{ avec } K \in \mathbb{R}.$$

Or, $y(0) = 4$, donc $4 = K + 2$, soit $K = 2$.

L'unique solution de cette équation différentielle avec la condition $y(0) = 4$ est donc : $y = 2e^{-4x} + 2$.

Côté physique & chimie

Déterminer la solution de l'équation différentielle :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e \text{ avec } \theta(0) = \theta_i$$

Méthode

Les solutions d'une équation différentielle de la forme $y' = ay + b$ s'écrivent $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec $K \in \mathbb{R}$ et $a \neq 0$.

Par analogie, les solutions de l'équation différentielle proposée sont : $\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$.

Sachant que $\theta(0) = \theta_i$, on trouve $K = \theta_i - \theta_e$.

L'unique solution de cette équation différentielle vérifiant $\theta(0) = \theta_i$ est donc : $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$.

À retenir !

Théorème – Les solutions d'une équation différentielle de la forme $y' = ay + b$ s'écrivent :

$$y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a} \text{ avec } K \in \mathbb{R} \text{ et } a \neq 0$$

Parcours d'exercices CORRIGÉS

Ce que je dois savoir et savoir faire

	Appliquer le cours	S'entraîner	Vers le BAC
■ Décrire qualitativement les trois modes de transfert thermique.	2	14	21
■ Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température.	4	14	22
■ Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par transfert thermique.	8	11	21
■ Établir l'expression de la température d'un système incompressible en fonction du temps.	8	11	21 23
■ Capacité mathématique : résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants et avec un second membre constant.	10	11	21 23

1 Le transfert thermique

2 CORRIGÉ Identifier le mode de transfert thermique (1)

| Exploiter des informations.

Un jour d'été très chaud, la température de l'eau du lac de Lacanau en Gironde est 23 °C, la température de l'air est 30 °C et celle du sable 25 °C.

1. Identifier le mode de transfert thermique principal entre l'eau et le Soleil, l'eau et le sable, l'eau et l'air.
2. Indiquer le sens de ces transferts et leur signe si le système étudié est l'eau du lac.

3 Identifier le mode de transfert thermique (2)

| Mobiliser et organiser ses connaissances.

Lors d'une découpe au laser, la focalisation du faisceau sur une zone réduite du matériau provoque son échauffement jusqu'à la fusion.

- Identifier le principal mode de transfert thermique mis en jeu lors de la découpe.

4 CORRIGÉ Déterminer un flux thermique

| Effectuer des calculs.

En été, un flux thermique Φ s'effectue à travers le pare-brise séparant l'habitacle d'une voiture, de l'air extérieur.



1. Déterminer le sens du flux thermique Φ traversant le pare-brise.
2. Calculer Φ .

Données

- Résistance thermique du verre d'un pare-brise : $R_{th} = 3,0 \times 10^{-3} \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}$.
- La résistance thermique R_{th} et le flux Φ orienté d'un point A à un point B sont liés par : $\Phi = \frac{(\theta_A - \theta_B)}{R_{th}}$.

5 Déterminer une résistance thermique

| Faire un schéma adapté.

Le flux thermique Φ à travers le mur d'une habitation est égal à 30 W. La température intérieure de l'habitation est $\theta_i = 19 \text{ °C}$ et la température extérieure $\theta_e = 10 \text{ °C}$.

1. Schématiser la situation en faisant apparaître Φ .
2. Calculer la résistance thermique R_{th} du mur extérieur.

2 La loi de Newton

▶ VIDÉO DE COURS Loi de Newton – QR Code p. 80

6 CORRIGÉ Comprendre la loi de Newton

| Mobiliser et organiser ses connaissances.

Le flux thermique transféré entre un système en convection et un thermostat, milieu extérieur à température constante, est modélisé par la loi de Newton :

$$\Phi = h \times S \times (T_e - T)$$

- Indiquer ce que représentent les grandeurs S , T_e et T dans cette loi et préciser les unités de h et Φ .

7 Exploiter la loi de Newton

| Effectuer des calculs.

La paroi d'un système incompressible à la température $T = 323 \text{ K}$ est mise en contact avec un fluide à la température constante $T_e = 293 \text{ K}$.

On suppose ici que le coefficient d'échange convectif h du fluide entre le système et le fluide est $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

- Calculer le flux convectif Φ entre le système et l'extérieur à travers une paroi dont la surface est $S = 1,0 \text{ m}^2$.

Donnée

Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (T_e - T)$.

8 CORRIGÉ Effectuer un bilan d'énergie (1)

| Mobiliser et organiser ses connaissances.

1. À partir de la loi de Newton, exprimer le transfert thermique Q effectué par convection entre un système incompressible à la température θ et le milieu extérieur

à la température constante θ_e (ou thermostat) pendant la durée Δt . Le système ou le milieu extérieur est fluide.

2. Exprimer Q en fonction de la masse m du système, de sa capacité thermique massique c et de la variation de température $\Delta\theta$.

3. Dédire des relations précédentes l'équation différentielle vérifiée par la température θ . **Utiliser le réflexe 1**

Donnée

Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$.

9 Effectuer un bilan d'énergie (2)

| Faire un schéma adapté.

Une tasse de café est réchauffée dans un four à micro-ondes.

1. Schématiser la situation en faisant apparaître tous les flux thermiques échangés entre le système {tasse et café} et le milieu extérieur.

2. Identifier le fluide qui échange de l'énergie par convection avec le système.

3. Effectuer le bilan d'énergie pour ce système incompressible, puis comparer les flux mis en jeu.

Donnée

On néglige tout transfert sous forme de travail et de transfert thermique avec le plateau support.

Côté maths

10 Résoudre une équation différentielle

À la sortie du four, un gâteau dans son moule est à la température $\theta_i = 180^\circ\text{C}$. Le système {gâteau et moule} est laissé à la température ambiante constante de $\theta_e = 20^\circ\text{C}$.



L'équation différentielle vérifiée par la température du système est : $\frac{d\theta}{dt} = a \times (\theta - \theta_e)$.

Dans cette relation, a est une constante négative qui dépend du système et du fluide étudiés.

1. Montrer, en résolvant l'équation différentielle, que $\theta = \theta_e + (\theta_i - \theta_e) \times e^{a \times t}$. **Utiliser le réflexe 2**

2. Quelle sera la température du gâteau une heure après sa sortie du four ?

Données

- On considère que le système {gâteau et moule} est un système incompressible.
- On néglige les échanges de matière entre le système et le milieu extérieur ; le seul transfert thermique est convectif.
- Dans la situation étudiée, $a = -3,8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Exercices S'entraîner

11 Connaître les critères de réussite

Un biberon à la bonne température

| Utiliser un modèle pour prévoir ; effectuer des calculs.

On trouve sur la notice d'un chauffe-biberon : « Chauffe un biberon sorti du réfrigérateur en moins de trois minutes. Le lait est constamment mélangé pendant qu'il chauffe, afin d'éviter la formation de points chauds. »



On étudie le transfert thermique convectif Q entre le lait et un chauffe-biberon maintenant les parois du biberon à la température constante $\theta_e = 50^\circ\text{C}$.

1. À l'aide de la loi de Newton, exprimer le transfert thermique Q effectué par convection entre le système {lait} et le milieu extérieur constituant un thermostat, pendant la durée Δt .

2. Donner l'expression de Q en fonction de la masse m du système, de sa capacité thermique massique c et de sa variation de température $\Delta\theta$.

3. Dédire des relations précédentes l'équation différentielle vérifiée par la température θ du lait.

4. Montrer que l'expression $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{a \times t} + \theta_e$ est solution de l'équation différentielle avec $a = -\frac{h \times S}{m \times c}$ et θ_i la température initiale du lait.

5. Un biberon contenant du lait à la température $\theta_i = 5^\circ\text{C}$ est placé dans le chauffe-biberon.

a. Au bout de quelle durée peut-il être donné à la température de 30°C au nourrisson ?

b. La durée obtenue est-elle conforme aux données du fabricant ?

Données

- On néglige tout transfert thermique autre que convectif entre le système et le milieu extérieur.
- Surface d'échange du lait dans le biberon : $S = 270 \text{ cm}^2$.
- Coefficient d'échange convectif du lait dans les conditions d'utilisation du chauffe-biberon : $h = 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.
- Capacité thermique massique du lait : $c = 4,2 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.
- Masse du lait dans le biberon : $m = 350 \text{ g}$.
- Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$.

Critères de réussite



Présentation des réponses

J'ai respecté les notations de l'énoncé (questions 1 et 2).

J'ai justifié la réponse en résolvant l'équation différentielle (question 4).

Conduite des calculs

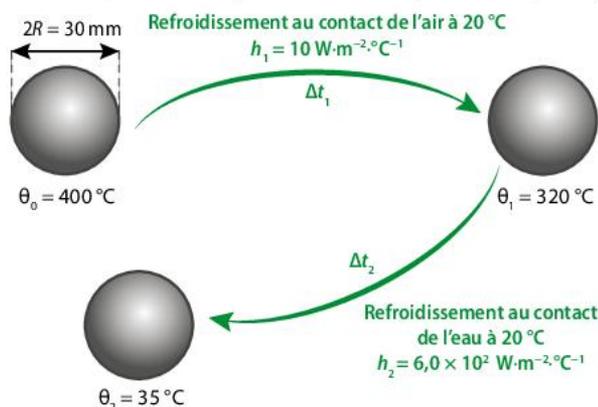
J'ai écrit l'équation différentielle sous la forme utilisée en mathématiques $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) (question 3).

J'ai converti les grandeurs fournies en des unités cohérentes entre elles (question 5).

12 Un métal bien trempé

Utiliser un modèle pour prévoir ; effectuer des calculs.

Pour améliorer la dureté de métaux, on leur fait subir une trempe : le métal est initialement porté à haute température, puis refroidi au contact d'un fluide de température constante, en deux étapes de durées respectives Δt_1 et Δt_2 .



1. Par application du premier principe de la thermodynamique au système {bille}, établir l'équation différentielle vérifiée par la température de la bille métallique étudiée lors de chacun des deux transferts thermiques convectifs successifs.

2.a. Donner l'expression de l'évolution de la température θ de la bille en fonction du temps lors de l'étape 1.

b. Déterminer la durée Δt_1 de la première étape.

3. Procéder de même pour l'étape 2.

4. Quel fluide assure le refroidissement le plus rapide ?

Données

- Masse volumique de la bille : $\rho = 3\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- Surface d'une sphère : $S = 4\pi \times R^2$.
- Volume d'une sphère : $V = \frac{4}{3}\pi \times R^3$.
- Capacité thermique massique de la bille : $c = 1,00 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$.
- On considère que le seul transfert thermique est convectif.

13 À chacun son rythme

Fer à repasser

Utiliser un modèle pour prévoir ; effectuer des calculs ; rédiger une explication.

Commencer par résoudre l'énoncé compact. En cas de difficultés, passer à l'énoncé détaillé.

Un fer à repasser électrique est constitué d'une semelle métallique de masse $m = 500 \text{ g}$ et de surface $S = 0,025 \text{ m}^2$ chauffée par un conducteur ohmique.

Le tableau suivant donne la température de repassage de différents tissus :

Acrylique	Polyester	Coton
110 °C	150 °C	210 °C

La semelle d'un fer est initialement portée à 210 °C pour le repassage d'un pantalon en coton. La température de la pièce dans laquelle le repassage est effectué est $\theta_e = 25 \text{ °C}$, considérée comme constante.

La température est supposée uniforme en tout point de la semelle.

Énoncé compact

Déterminer la durée Δt nécessaire à l'abaissement de la température de la semelle du fer à repasser pour le repassage d'un tee-shirt en polyester après celui d'un pantalon en coton.

Énoncé détaillé

1. Par application du premier principe de la thermodynamique au système {semelle}, établir l'équation différentielle vérifiée par la température de la semelle du fer lors du transfert thermique convectif avec le milieu extérieur.

2. En déduire l'expression de l'évolution de la température θ de la semelle en fonction du temps.

3. Déterminer la durée Δt nécessaire à l'abaissement de la température de la semelle du fer à repasser pour le repassage d'un tee-shirt en polyester après celui d'un pantalon en coton.

Données

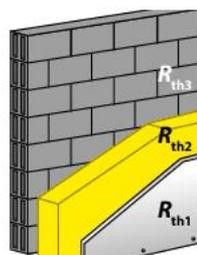
- On néglige tout transfert thermique autre que convectif.
- Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$.
- Capacité thermique massique de la semelle : $c = 450 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- Coefficient d'échange convectif de l'air humide dans les conditions du repassage : $h = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$.

14 Pertes thermiques

Effectuer des calculs ; faire un schéma adapté.

Un mur est constitué d'une cloison de plâtre de résistance thermique R_{th1} collée à une couche de laine de verre de résistance thermique R_{th2} .

L'ensemble est fixé à une paroi de béton de résistance thermique R_{th3} .



La surface S du mur est 20 m^2 . La température à l'intérieur de la pièce est 20 °C ; celle du milieu extérieur est 5 °C .

La résistance totale d'un mur constitué de couches accolées est égale à la somme des résistances thermiques de chacune des couches.

1. Schématiser la situation en indiquant par une flèche le sens des transferts thermiques à travers le mur.

2. Indiquer le mode de transfert thermique mis en jeu.

3. Calculer la résistance thermique totale du mur R_{th} .

4. Calculer le flux thermique Φ traversant le mur.

5. Comparer ce flux thermique Φ avec le flux thermique traversant une simple paroi de béton pour une même différence de température.

Données

- Résistances thermiques en $\text{°C} \cdot \text{W}^{-1}$ pour $S = 20 \text{ m}^2$:

Plâtre	Laine de verre	Béton
0,039	0,125	0,013

15  Résolution de problème

Info, intox ou igloo ?

| Construire les étapes d'une résolution de problème.

Lors d'une sortie dans les Pyrénées, un randonneur a construit son igloo et s'y installe pour la nuit. Chaque heure de son sommeil, il fournit par convection et rayonnement le transfert thermique $Q_1 = 0,50 \text{ MJ}$ à l'air intérieur supposé incompressible. La température est alors maintenue constante dans l'igloo.



Le randonneur est considéré comme la seule source d'énergie à l'intérieur de l'igloo.

- Le commentaire publié par le randonneur est-il réaliste ?

A Données concernant l'igloo

L'igloo est constitué d'un mur de neige d'épaisseur $e = 30 \text{ cm}$ et de surface totale $S = 14 \text{ m}^2$.

La température intérieure θ est constante, et la température extérieure θ_e est égale à $-15 \text{ }^\circ\text{C}$.

B Résistance et conductivité thermiques

On considère ici que la résistance thermique R_{th} est proportionnelle à l'épaisseur de matériau e , inversement proportionnelle à sa conductivité thermique λ et à sa surface d'échange S :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

avec e en m, S en m^2 et λ en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

C Conductivité thermique de différents matériaux

Matériau	Neige fraîche	Neige compactée
Conductivité λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	0,05	0,25

D Commentaire du randonneur sur un réseau social

« J'ai dormi à $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ dans mon igloo cette nuit. »

16 Bivouac à la belle étoile en montagne

| Extraire et organiser l'information ; effectuer des calculs ; argumenter.

D'après Baccalauréat Polynésie, 2017

On lit dans une documentation sur les matelas de sol en mousse : « Une fois allongé, vous écrasez votre sac de couchage, ce qui le rend inefficace. En contact avec



un sol plus froid que votre corps, vous perdez de l'énergie par transfert thermique.

L'utilisation d'un matelas de sol, qui conserve son épaisseur et sa capacité d'isolation même soumis à des forces pressantes, limite ce phénomène. »

Avant d'acquiescer un matelas de sol, un randonneur a hésité entre deux modèles : le « Sleepy » et le « Randy ».

A Caractéristiques du matelas de sol « Sleepy »

- Conductivité thermique : $\lambda = 0,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
- Dimensions (longueur \times largeur \times épaisseur) : $193 \text{ cm} \times 62 \text{ cm} \times 1,1 \text{ cm}$.

1. a. Indiquer dans quel sens s'effectue le transfert thermique à travers le matelas lorsque le randonneur est allongé.

b. Décrire le phénomène de transfert thermique par conduction à l'échelle microscopique.

2. Le randonneur souhaite comparer les capacités d'isolation thermique des deux matelas de sol, en se plaçant dans les mêmes conditions d'utilisation. Les résistances thermiques des vêtements et du sac de couchage sont négligeables devant celle du matelas.

On considère que le seul flux thermique est celui qui traverse l'interface du matelas en contact avec le randonneur et du sol.

a. Parmi les surfaces S de contact randonneur-matelas proposées, laquelle semble correctement estimée ? $0,005 \text{ m}^2$; $0,05 \text{ m}^2$; $0,5 \text{ m}^2$; 5 m^2 .

b. Calculer le flux thermique Φ à travers la partie inférieure du matelas « Sleepy » en contact avec le sol.

c. Le flux thermique à travers le matelas « Randy », dans les mêmes conditions d'utilisation, est 80 W . Indiquer quel matelas possède les meilleures capacités d'isolation thermique.

Données

• La résistance thermique R_{th} d'une paroi d'épaisseur e et de surface S est liée à la conductivité thermique λ par la relation :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

• Température de l'air et du sol : $3 \text{ }^\circ\text{C}$; de la peau : $33 \text{ }^\circ\text{C}$.

17  One or more layers ?

| Pratiquer une langue vivante étrangère.

The grid below shows the thermal resistances of air and several materials with a surface of 1.0 m^2 and a thickness of 2 mm .

Material	Thermal resistance ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
Air	7.6×10^{-2}
Nylon	8.0×10^{-3}
Leather	1.1×10^{-2}
Felt	5.5×10^{-2}

1. What is the best material for winter clothes ?

2. a. What do you have between two layers of clothing ?

b. Why do we advise to wear several thin clothes instead of a single thick one to protect ourself from the winter cold ?

18 Eau chaude sanitaire

Extraire et organiser l'information ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique.

D'après Baccalauréat Antilles, 2019

La part de la consommation d'électricité liée à l'eau chaude sanitaire est en passe de devenir la plus importante dans les bâtiments résidentiels neufs. L'objectif de cet exercice est d'étudier les performances thermiques d'un ballon d'eau chaude sanitaire.



A Caractéristiques techniques d'un ballon d'eau chaude sanitaire

Capacité	Tension	Puissance
200 L	230 V	2 200 W

- Durée nécessaire pour chauffer toute l'eau du ballon de 15 à 65 °C : 5 h 17 min.
- Surface d'échange thermique du ballon avec le milieu extérieur : 2,9 m².
- Le ballon est isolé avec de la laine de roche d'épaisseur $e = 70$ mm et de conductivité thermique $\lambda = 0,036 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- Coefficient de refroidissement C_r du ballon pour de l'eau à 65 °C et une température ambiante à 20 °C : $C_r = 0,18 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$.

B Coefficient de refroidissement

Selon la réglementation thermique RT 2012, les chauffe-eau à accumulation doivent avoir un coefficient de refroidissement C_r inférieur ou égal à $2 \times V^{-0,4}$ avec V le volume (en litre) du ballon.

- Calculer la durée nécessaire pour chauffer toute l'eau du ballon de 15 à 65 °C (on néglige les pertes thermiques).
 - Vérifier que la valeur de cette durée est cohérente avec les caractéristiques fournies par le fabricant.
- Montrer que le flux thermique à travers les parois du ballon entre l'eau à 65 °C et l'air extérieur à 20 °C est $\Phi = 67 \text{ W}$.
 - En déduire l'énergie perdue par le ballon en une journée. Exprimer le résultat en wattheure.
- En utilisant le résultat précédent, évaluer le coefficient de refroidissement C_r du ballon d'eau chaude sanitaire étudié. Le résultat est-il cohérent avec la donnée du fabricant ?
- La réglementation thermique RT2012 concernant C_r est-elle respectée pour ce ballon ?

Données

- On considère pour simplifier ici que la résistance thermique R_{th} d'une paroi d'épaisseur e et de surface S est liée à la conductivité thermique λ par :

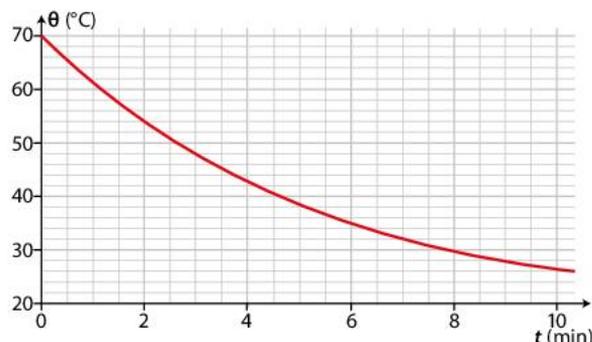
$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

- Capacité thermique massique de l'eau : $c_{eau} = 4 180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- Masse volumique de l'eau liquide : $\rho = 1 000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

19 Refroidissement d'un chocolat

Exploiter un graphique ; utiliser un modèle pour expliquer.

On étudie le refroidissement d'un chocolat initialement à une température $\theta_i = 70$ °C. La température supposée constante où se trouve le chocolat est $\theta_e = 20$ °C. On néglige tout transfert thermique autre que convectif. Une sonde placée dans la tasse permet de mesurer l'évolution de la température en fonction du temps. Les résultats sont reportés sur le graphique ci-dessous.



La température θ du chocolat en fonction du temps t est donnée par la relation : $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_e$. τ est le temps caractéristique de l'évolution de la température du système.

- Déterminer le temps caractéristique τ en utilisant le graphique et l'expression de θ .
- Indiquer les affirmations fausses et les corriger.
 - La température du chocolat dans la tasse n'évolue plus au bout de 10 minutes après la préparation du chocolat.
 - La vitesse de refroidissement du chocolat est constante.
 - Au bout d'une heure, la température du chocolat dans la tasse peut devenir inférieure à 20 °C.

20 La science infuse

Utiliser un modèle pour prévoir ; effectuer des calculs.



La température d'infusion du thé Gyokuro, un thé vert haut de gamme, est de 60 °C pour ne pas faire ressortir son amertume et la température de dégustation idéale à 48 °C. Après infusion, le thé est placé dans une tasse de masse m , de surface d'échange S avec l'air extérieur et de capacité thermique massique c . La température du système {tasse et thé}, incompressible est alors $\theta_i = 60$ °C. On néglige tout échange de matière et tout échange thermique autre que convectif entre le système et le milieu extérieur.

- Établir l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système.
- Déterminer l'expression de la solution de l'équation différentielle θ en fonction de k .
- Déterminer la durée au bout de laquelle la boisson peut être idéalement consommée dans une pièce où la température ambiante est $\theta_e = 20$ °C.

Données

- $k = \frac{h \times S}{m \times c}$ avec ici $k = 1,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.
- Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$.

Utiliser la bonne unité

Transfert thermique Q	Joule (J)
Flux thermique Φ ou puissance \mathcal{P}_{th}	Watt (W)
Résistance thermique R_{th}	$K \cdot W^{-1}$ ou $^{\circ}C \cdot W^{-1}$

Ne pas confondre...



- La température T donnée en kelvin, la température θ donnée en degré Celsius et le temps t .
- L'intervalle Δt de temps et la variation ΔT de température.

Prendre garde !



Le flux thermique Φ est une puissance et non une énergie.

Préparation à l'écrit

→ Les bons réflexes 1 et 2 sont présentés p. 82

21 CORRIGE

50 min

Vitrage

Exploiter l'information ; effectuer des calculs ; rédiger une explication.

Les parties I et II sont indépendantes.

Une pièce d'habitation possède une baie vitrée de surface $S = 8,0 \text{ m}^2$ en contact avec l'air extérieur. On considère que les transferts thermiques avec l'extérieur de la pièce se font à travers la surface de la baie vitrée. La température de l'air extérieur $T_e = 273 \text{ K}$ est constante. La pièce est chauffée par un radiateur électrique alimenté par le secteur.



A Caractéristiques du radiateur électrique

Le radiateur électrique convertit intégralement le travail électrique qu'il reçoit en transfert thermique Q qu'il évacue dans la pièce. La tension d'alimentation est $U = 230 \text{ V}$ et la résistance $R = 25,0 \Omega$.

B Caractéristiques de vitrages

Vitrage de surface S	Résistance thermique $R_{th} (K \cdot W^{-1})$
Simple : 1 couche de verre	6×10^{-4}
Double : 2 couches de verre et 1 d'argon	0,10
Triple : 3 couches de verre et 2 couches d'argon	0,16

Partie I Constitution du vitrage de la baie vitrée

On souhaite effectuer un bilan d'énergie de la pièce pendant une durée de référence Δt_{ref} .

Le radiateur électrique qui chauffe la pièce ne fonctionne que pendant 10 % de la durée de référence. On obtient une température $T_1 = 293 \text{ K}$ constante en tout point de la pièce.

1. a. Quels modes de transfert thermique peuvent être mis en jeu entre le radiateur électrique et la pièce ?

b. Exprimer le transfert thermique Q fourni par le radiateur à la pièce pendant la durée de référence Δt_{ref} en fonction de la tension d'alimentation U du radiateur et de sa résistance R .

2. En déduire, en effectuant le bilan d'énergie du système {pièce et baie vitrée}, le flux thermique Φ traversant la baie vitrée et échangé avec le milieu extérieur.

3. Quel type de vitrage est utilisé pour cette baie vitrée ?

↳ Coup de pouce QR Code p. 80

Partie II Simple vitrage

Il s'agit d'un simple vitrage. On stoppe le chauffage. On considère que le système {pièce et baie vitrée} effectue un transfert thermique par convection avec l'air extérieur et qu'il est incompressible, de capacité thermique totale $C = m \times c = 100 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$, avec c la capacité thermique massique du système. La température initiale du système T_1 est 293 K .

1. Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour le système {pièce et baie vitrée} pendant une durée Δt au cours de laquelle la variation de température du système est ΔT . Retrouver la relation $C \times \Delta T = \Phi \times \Delta t$ où Φ est le flux thermique convectif échangé entre le système {pièce et baie vitrée} et l'air extérieur. Φ est considéré constant.

2. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température T du système.

Utiliser le réflexe 1

3. Résoudre cette équation différentielle.

Utiliser le réflexe 2

4. Déterminer la durée au bout de laquelle la température du système aura atteint la température limite de 289 K .

Données

- Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (T_e - T)$.
- Coefficient d'échange convectif dans la situation étudiée : $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Exercices Type SI

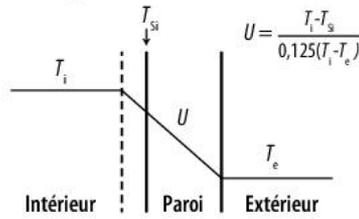
22
CORRIGÉ

20
min

Diagnostic thermique

Faire un schéma adapté ; mobiliser ses connaissances ; effectuer des calculs.

Un guide de diagnostic thermique fournit les indications suivantes : « Pour déterminer la résistance thermique d'une paroi, il faut mesurer simultanément la température extérieure (T_e), la température intérieure (T_i) et la température de la surface de la paroi du côté intérieur (T_{Si}). Si les conditions de la mesure sont bien maîtrisées, ces trois températures reliées par une formule empirique permettent de calculer la résistance thermique de la paroi considérée. » Le coefficient de transfert thermique U est exprimé en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.



T_e = Température extérieure
 T_i = Température intérieure
 T_{Si} = Température de surface intérieure
 U = Coefficient de transfert thermique
 $R = 1/U$ = Résistance thermique surfacique

Le diagnostiqueur mesure une température intérieure d'une habitation $T_i = 293$ K. La température de la face intérieure du mur de surface $S = 25,0$ m² est $T_{Si} = 291$ K. À l'extérieur de l'habitation, la température est : $T_e = 268$ K. Ces températures sont supposées constantes.

- Calculer la résistance thermique R_{th} du mur de l'habitation en $K \cdot W^{-1}$.
- Déterminer le flux Φ traversant le mur lors de la mesure.
- a. Schématiser la situation et indiquer le sens du transfert thermique Q .
 b. Le régime étant considéré comme permanent indépendant du temps, calculer le transfert thermique Q traversant le mur durant une heure.

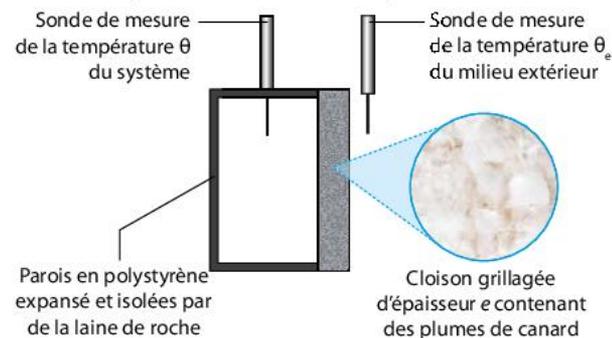
23
CORRIGÉ

45
min

Un isolant naturel

Discuter un modèle ; mobiliser ses connaissances ; faire preuve d'esprit critique et argumenter.

Pour évaluer les propriétés isolantes du plumage des canards, un groupe d'élèves réalise le montage expérimental ci-après et effectue deux expériences.

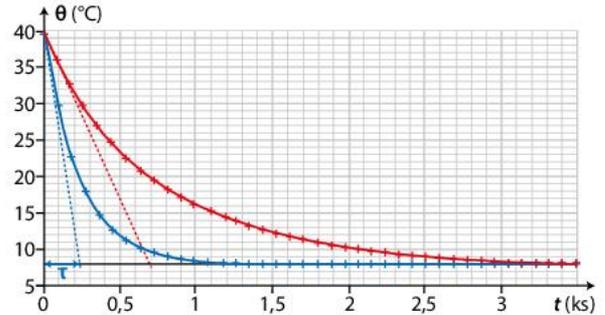


L'expérience A est la suivante :

- la cloison est remplie de 4,5 g de plumes de duvet ;
- la boîte est chauffée à l'étuve jusqu'à stabilisation de la température interne du système à $\theta_i = 40$ °C ;

- la boîte est placée à l'extérieur du laboratoire, où la température est $\theta_e = 8$ °C, constante ; la température interne θ est mesurée au cours du temps ;
- l'acquisition informatisée des mesures est alors réalisée sur une durée d'une heure.

L'expérience B est similaire, mais en laissant la cloison sans plume. Les courbes obtenues sont reproduites ci-dessous :



- Indiquer le mode de transfert thermique entre l'intérieur de la boîte et le milieu extérieur.
- Identifier la courbe correspondant à la cloison munie de plumes et à la cloison sans plumes.
- Le système {boîte et cloison} est assimilé à un système incompressible. L'équation différentielle vérifiée par la température θ est $\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_e - \theta}{\tau}$ où τ est le temps caractéristique du système.
Donner la solution de cette équation différentielle en fonction de t et des constantes τ , θ_i et θ_e .

Utiliser le réflexe 2

- Le temps caractéristique τ est déterminé en traçant la tangente à l'origine sur la courbe $\theta = f(t)$. Lire graphiquement τ dans les deux expériences.
- Pour s'assurer de la validité de leurs résultats, les élèves reproduisent plusieurs fois l'expérience A dans les mêmes conditions. Ils rassemblent la valeur expérimentale du temps caractéristique dans le tableau ci-dessous :

Numéro de l'expérience	1	2	3	4	5	6
τ (s)	695	789	701	734	688	686

- Déterminer la moyenne $\bar{\tau}$ de la série de mesures, ainsi que l'incertitude-type $u(\tau)$ par une approche statistique.
- Écrire τ sous la forme d'un encadrement.
- Justifier que l'expérience réalisée par le groupe d'élèves confirme que le plumage constitue une couche isolante qui minimise le flux thermique traversant la paroi du milieu intérieur vers le milieu extérieur.

Données

- Pour l'expérience B sans plumes de canard : $\tau_B = (238 \pm 15)$ s.
- n est le nombre de fois où l'expérience a été effectuée dans les mêmes conditions.
- Incertitude-type : $u = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$. L'écart type σ_{n-1} peut être calculé à l'aide d'un tableur ou d'une calculatrice.

6

Sons et effet Doppler



Lors d'une course automobile, les spectateurs perçoivent différemment, avant et après passage devant les gradins, un son émis par un bolide.

- Pourquoi la perception du son est-elle différente ?

➤ Rendez-vous : activité 2 p. 94

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal. **Activité 2 p. 94**
- Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption. **Activité 2 p. 94**
- Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. **Exercice 11 p. 103**
- Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension. **Exercice 21 p. 105**
- Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. **Exercice 15 p. 103**
- Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse. **Activité 2 p. 94**
- **Capacité mathématique** : utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque. **Exercice 5 p. 102**

ONDES SONORES

Intensité sonore I

- Puissance sonore par unité de surface
- Exprimée en $W \cdot m^{-2}$

Niveau d'intensité sonore L

Exprimé en décibel (dB) selon une échelle logarithmique

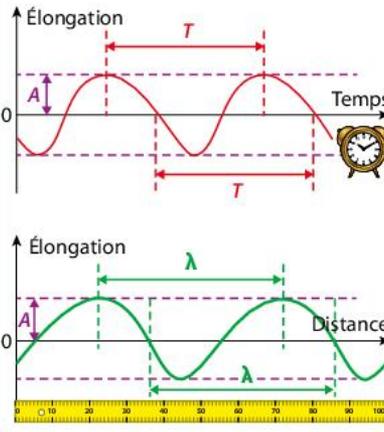
Intensité sonore I ($W \cdot m^{-2}$)	Niveau d'intensité sonore L (dB)
10^{-4}	80
10^{-5}	70
10^{-6}	60
10^{-7}	50
10^{-8}	40
10^{-9}	30
10^{-10}	20
10^{-11}	10
10^{-12}	0

I et L varient dans le même sens.

Intensité et niveau sonores

Onde mécanique progressive périodique

Double périodicité



Période T (période temporelle)

Plus petite durée au bout de laquelle la perturbation se répète en un point donné du milieu matériel.

Longueur d'onde λ (période spatiale)

Distance parcourue par l'onde pendant la durée T .

Fréquence f

Nombre de répétitions de la perturbation par seconde.

f en Hz $\rightarrow f = \frac{1}{T}$ $\leftarrow T$ en s

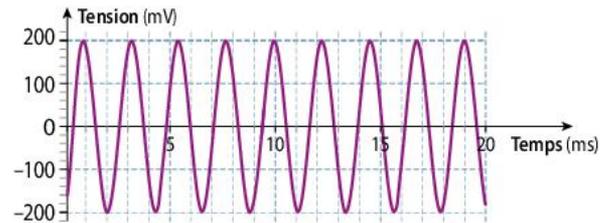
Relation entre période T , longueur d'onde λ et célérité v

v en $m \cdot s^{-1}$ $\rightarrow v = \frac{\lambda}{T}$ $\leftarrow \lambda$ en m $\leftarrow T$ en s

Réactiver ses connaissances

La courbe ci-contre correspond à l'enregistrement du son émis par un diapason. Le son se propage dans l'air avec une célérité de $345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. Déterminer la fréquence du son produit par cet instrument.
2. Déterminer la longueur d'onde correspondante.



Flash test

5 min

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s).

	A	B	C
1. La fréquence f , la longueur d'onde λ et la célérité v d'une onde sont liées par la relation :	$f = \frac{\lambda}{v}$	$f = \lambda \times v$	$f = \frac{v}{\lambda}$
2. Une onde périodique, de longueur d'onde 30 cm et se propageant dans l'air avec une célérité de $345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a une fréquence de l'ordre de :	10^1 Hz	10^2 Hz	10^3 Hz
3. L'intensité sonore I est exprimée en $W \cdot m^{-2}$. Pour une puissance sonore P répartie sur une surface S , I a pour expression :	$I = \frac{P}{S}$	$I = \frac{S}{P}$	$I = P \times S$

Activité 1 expérimentale

Atténuation des sons

Notions

- Atténuation (en dB)
- Intensité sonore
- Niveau d'intensité sonore

Au bord de certaines routes, en particulier dans les zones très urbanisées, des murs antibruit ont pour fonction de diminuer les nuisances sonores liées à la circulation.



► **Objectif de l'activité :** Comment lutter contre les nuisances sonores ?

Tâche complexe

A Niveau d'intensité sonore

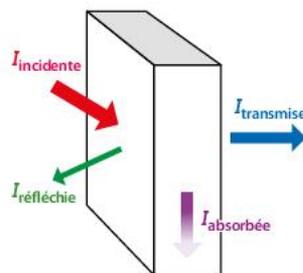
Le niveau d'intensité sonore, noté L , se mesure avec un sonomètre. Son unité est le décibel (dB). De nombreuses applications « sonomètre » pour smartphone permettent aussi la mesure du niveau d'intensité sonore.



CNRS et Ifsttar/Noise-Planet (www.noise-planet.org)

B Atténuation sonore

Lorsqu'une onde sonore rencontre une paroi, seule une partie de l'énergie incidente est transmise. Le reste de l'énergie est réfléchi et/ou absorbé.



Puisque l'énergie se conserve, les intensités sonores sont liées par :

$$I_{\text{incidente}} = I_{\text{réfléchie}} + I_{\text{transmise}} + I_{\text{absorbée}}$$

L'atténuation sonore A d'un mur antibruit est liée aux niveaux d'intensité sonore L des ondes incidente et transmise :

$$A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$$

L'atténuation s'exprime en décibel (dB).

MATÉRIEL DISPONIBLE



Étapes de la démarche d'investigation

- RELIRE les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter.
- REFORMULER, si besoin, le problème en utilisant un vocabulaire scientifique.
- ÉMETTRE une hypothèse permettant d'y répondre.
- ÉLABORER un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée.
- NOTER les observations, les interpréter et conclure.

Investigation

APP · ANA-RAIS · RÉA · VAL · COM

- À l'aide d'une série de mesures, individuelles ou collectives, déterminer comment varie le niveau d'intensité sonore en un point lorsque la distance entre ce point et la source sonore double.

APP · ANA-RAIS · RÉA · VAL · COM

- Proposer et mettre en œuvre un protocole, à l'aide du matériel disponible, pour optimiser la conception d'un mur antibruit.

Un pas vers le cours

Présenter sous une forme appropriée COM

- Comment lutter contre les nuisances sonores ?

Activité expérimentale

2

Effet Doppler et vitesse d'un véhicule

Notion

Décalage Doppler

Dans les gradins d'un circuit de course automobile, un spectateur perçoit une modification de la hauteur du son émis par la voiture lors de son passage : la fréquence du son perçu n'est pas la même lorsque la voiture s'approche et lorsqu'elle s'éloigne. C'est l'effet Doppler. Il est possible de mesurer la valeur de la vitesse de la voiture grâce à ce phénomène.

► **Objectif de l'activité :** Comment mesurer la valeur de la vitesse d'un objet à partir de l'effet Doppler ?



A Effet Doppler

L'effet Doppler correspond au décalage de la fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique reçue par un observateur par rapport à la fréquence de l'onde émise λ lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

- Lorsque le véhicule est à l'arrêt, la fréquence de l'onde sonore perçue par l'observateur est la même que celle de l'onde émise par le véhicule. Elle est notée f_0 .



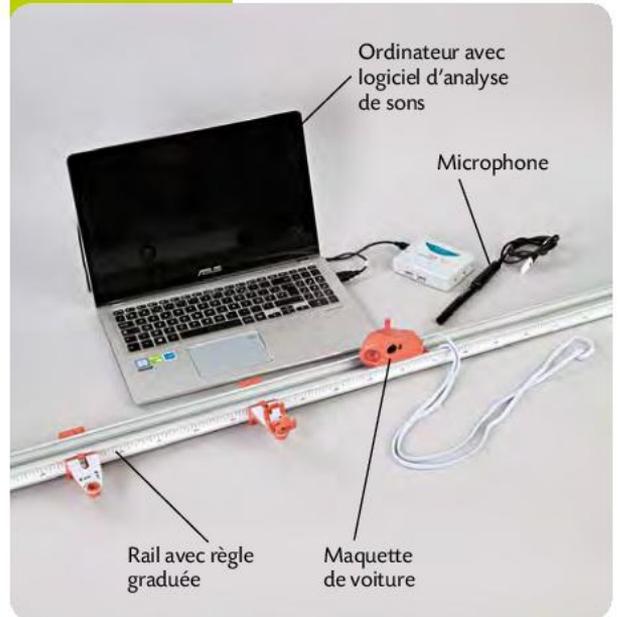
- Lorsque le même véhicule se rapproche à une vitesse de valeur v , la fréquence f_1 de l'onde perçue est différente de la fréquence f_0 de l'onde émise.



Dans cette situation et avec v très inférieur à v_{son} , le décalage Doppler a pour expression :

$$\Delta f = f_1 - f_0 = \frac{v}{v_{\text{son}}} \times f_0$$

MATÉRIEL DISPONIBLE



Pratique expérimentale

Elaborer et mettre en œuvre un protocole ANA-RAIS · RÉA

1 À l'aide du matériel disponible, proposer puis mettre en œuvre un protocole expérimental permettant de déterminer la valeur de la vitesse d'un objet mobile.

Estimer une incertitude de mesure VAL

2 a. Répéter plusieurs fois la mesure et consigner les résultats dans un tableau.

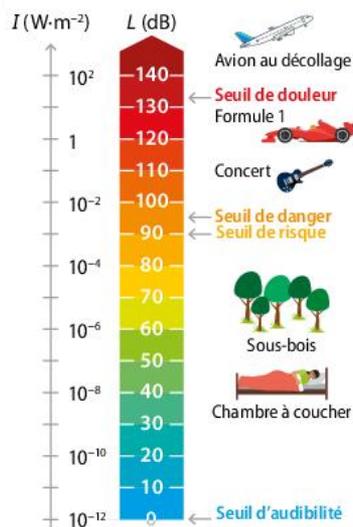
b. Évaluer la moyenne de la grandeur mesurée, ainsi que l'incertitude-type (Fiche 3, rabat IV). Identifier des causes possibles expliquant la dispersion des résultats obtenus.

Un pas vers le cours

Utiliser un vocabulaire scientifique adapté et rigoureux COM

3 Comment déterminer la valeur de la vitesse d'un objet à partir du décalage Doppler ?

A Échelle d'intensité sonore I et de niveau d'intensité sonore L



➤ Par convention, les seuils correspondent aux moyennes calculées sur la population pour des sons de fréquence 1 000 Hz.

B Sonomètre mesurant un niveau d'intensité sonore



Point maths ➔ Côté maths 4 p. 101

- Les fonctions $x \mapsto \log x$ (pour $x > 0$) et $x \mapsto 10^x$ sont disponibles sur une calculatrice.
- Propriétés de la fonction $x \mapsto 10^x$:

$$10^{(a+b)} = 10^a \times 10^b$$

$$10^{(a-b)} = \frac{10^a}{10^b}$$

$$10^{\log a} = a \text{ pour tout } a > 0$$
- Propriétés de la fonction $x \mapsto \log x$ pour tout $a > 0$ et $b > 0$:

$$\log(a \times b) = \log a + \log b$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b$$

$$\log(10^a) = a$$

1 Le niveau d'intensité sonore

a. Intensité sonore

- Nous percevons les sons de manière plus ou moins intense.

L'intensité sonore I est la puissance P par unité de surface S transportée par une onde sonore.

$$I \text{ en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \rightarrow I = \frac{P}{S} \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en } \text{W} \\ S \text{ en } \text{m}^2 \end{array} \right.$$

- L'oreille humaine perçoit des signaux sonores dont l'intensité sonore est comprise entre une valeur minimale (seuil d'audibilité) et une valeur maximale (seuil de douleur) (échelle A). Ces seuils dépendent de la fréquence du son perçu et varient d'un individu à un autre.

b. Niveau d'intensité sonore

- L'écart de l'ordre de $10^{14} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, entre les intensités sonores extrêmes rend peu pratique l'utilisation de cette grandeur. C'est pourquoi on définit le **niveau d'intensité sonore L** , plus facilement exploitable, à partir de l'intensité associée au seuil d'audibilité (échelle A).

Le **niveau d'intensité sonore L** est défini par :

$$L \text{ en dB} \rightarrow L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \left\{ \begin{array}{l} I \text{ et } I_0 \text{ en } \\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \end{array} \right.$$

I_0 est l'intensité sonore de référence.

Le **niveau d'intensité sonore** noté L , comme *level* qui signifie « niveau » en anglais, a pour unité le décibel (dB). Il est mesuré à l'aide d'un sonomètre (photographie B).

L'intensité sonore de référence choisie, notée I_0 , correspond au seuil d'audibilité moyenne à 1 kHz : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (échelle A).

- Lorsque plusieurs instruments de musique jouent ensemble, les intensités sonores I des sons de chaque instrument s'ajoutent. En revanche, les niveaux d'intensité sonore L ne s'ajoutent pas.

Exemple : Lorsque l'intensité sonore I est multipliée par 2 et devient $I' = 2I$, alors le niveau d'intensité sonore L devient L' .

$$L' = 10 \log\left(\frac{I'}{I_0}\right) \text{ d'où } L' = 10 \log\left(\frac{2I}{I_0}\right)$$

$$L' = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) + 10 \log(2) \text{ soit } L' = L + 3$$

Lorsque l'intensité sonore I est multipliée par 2, le niveau d'intensité sonore L augmente de 3 dB.

La fonction $x \mapsto 10^x$ est la réciproque de la fonction logarithme décimal de x : $x \mapsto \log x$ (pour $x > 0$). Elle permet de calculer I à partir de L .

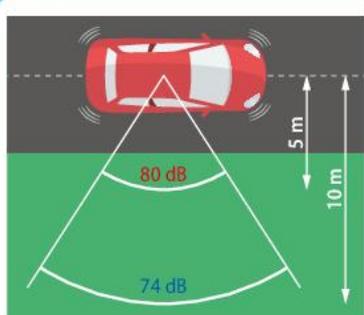
- En partant de la définition du niveau d'intensité sonore $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$, on obtient :

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

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

Il est donc possible de calculer une intensité sonore à partir du niveau d'intensité sonore correspondant.

C Atténuation géométrique



➤ Quand la distance à la source est multipliée par 2, l'onde se répartit sur une surface $2^2 = 4$ fois plus grande. Alors, le niveau d'intensité sonore diminue de 6 dB.

c. Atténuation géométrique

L'intensité sonore est égale à la puissance de l'onde par unité de surface. Lorsqu'une onde se propage à partir d'une source ponctuelle, l'énergie transportée par l'onde se répartit sur une surface de plus en plus grande. L'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore diminuent donc.

Exemple : lorsque la distance à la source est multipliée par 2, le niveau d'intensité sonore est atténué de 6 dB (dessin C).

L'**atténuation géométrique A**, en décibel (dB), est la diminution du niveau d'intensité sonore L lorsque la distance à la source sonore augmente :

$$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}}$$

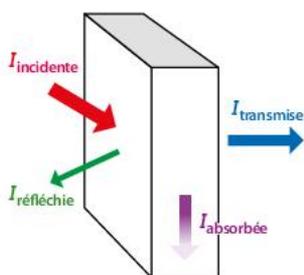
d. Atténuation par absorption

Lorsqu'une onde sonore rencontre une paroi, elle peut être transmise, réfléchiée ou absorbée (schéma D).

L'**atténuation par absorption A**, en décibel (dB), évalue l'efficacité d'un matériau à lutter contre la transmission de bruit :

$$A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$$

D Interactions entre une onde sonore et une paroi



2 L'effet Doppler

a. Présentation de l'effet Doppler

• Le son émis par un véhicule est perçu plus aigu quand le véhicule s'approche d'un observateur, et plus grave quand il s'en éloigne.

L'**effet Doppler** est l'existence d'un décalage entre la fréquence f_E d'une onde électromagnétique ou mécanique émise et la fréquence f_R de l'onde reçue lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie. Le **décalage Doppler** est $\Delta f = f_R - f_E$.

• La fréquence f d'une onde, sa période T et sa longueur d'onde λ sont liées les unes aux autres, l'effet Doppler correspond donc aussi à un décalage de période ou de longueur d'onde.

Le **signe du décalage Doppler** dépend du sens d'évolution de la distance entre l'émetteur E et le récepteur R.

Rapprochement de E et R	Distance constante entre E et R	Éloignement de E et R
Lorsque l'émetteur (Samu) s'approche du récepteur (brancardier), celui-ci perçoit des ondes de longueur d'onde $\lambda_R < \lambda_E$. Alors $T_R < T_E$ et $f_R > f_E$ donc $\Delta f > 0$	Lorsque l'émetteur est immobile par rapport au récepteur, celui-ci perçoit des ondes de longueur d'onde $\lambda_R = \lambda_E$. Alors $T_R = T_E$ et $f_R = f_E$ donc $\Delta f = 0$	Lorsque l'émetteur s'éloigne du récepteur, celui-ci perçoit des ondes de longueur d'onde $\lambda_R > \lambda_E$. Alors $T_R > T_E$ et $f_R < f_E$ donc $\Delta f < 0$

E Radar routier utilisant l'effet Doppler



> Les ondes émises par le radar sont réfléchies par le véhicule, puis captées par le radar.

lycee.hachette-education.com/physique-si/le



Le décalage Doppler

VIDÉO DE COURS

COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

L'expression du décalage Doppler peut être simplifiée si la valeur de la vitesse de déplacement est très inférieure à celle de propagation de l'onde.

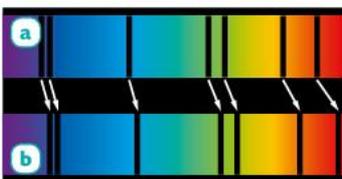
Pour un rapprochement :

$$\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}} - v} \approx f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}}} > 0$$

Pour un éloignement :

$$\Delta f = -f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}} + v} \approx -f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}}} < 0$$

F Effet Doppler-Fizeau pour un éloignement



> Décalage vers le rouge (redshift) des raies entre le spectre obtenu pour une source et un observateur immobiles (a) et celui obtenu pour un éloignement entre la source et l'observateur (b).

b. Expression du décalage Doppler

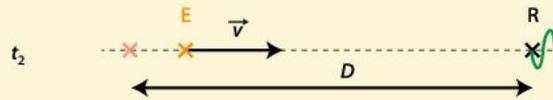
• L'expression du décalage Doppler dépend du type d'onde, de la nature du mouvement de l'émetteur par rapport au récepteur et de la présence éventuelle d'une réflexion des ondes (photographie E).

Considérons un émetteur d'ondes sonores E, qui se rapproche d'un récepteur fixe R avec une vitesse de valeur v . E émet avec une période T_E une succession de signaux qui se propagent à la célérité $v_{\text{onde}} > v$.

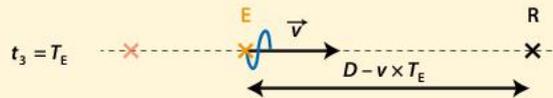
• À une date $t_1 = 0$ s, un signal est émis par E, alors que la distance entre E et R est égale à D .



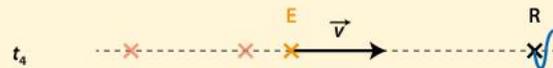
• Ce signal émis à la date t_1 est reçu par R à la date $t_2 = \frac{D}{v_{\text{onde}}}$.



• À la date $t_3 = T_E$, donc 1 période après la première émission, un autre signal est émis, alors que l'émetteur E se trouve à une distance $D - v \times T_E$ de R.



• Ce signal émis à la date t_3 est reçu par R à la date $t_4 = T_E + \frac{D - v \times T_E}{v_{\text{onde}}}$.



Les signaux émis par E avec une période $T_E = t_3 - t_1$ sont reçus par R avec une période $T_R = t_4 - t_2$.

$$\text{Donc } T_R = T_E + \frac{D - v \times T_E}{v_{\text{onde}}} - \frac{D}{v_{\text{onde}}} = T_E - \frac{v \times T_E}{v_{\text{onde}}} = T_E \times \left(1 - \frac{v}{v_{\text{onde}}}\right)$$

Comme $f = \frac{1}{T}$ cela conduit à $f_R = f_E \times \frac{v_{\text{onde}}}{v_{\text{onde}} - v}$.

Dans le cas d'un émetteur se rapprochant d'un récepteur fixe, le décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ est donc : $\Delta f = f_E \times \frac{v_{\text{onde}}}{v_{\text{onde}} - v} - f_E = f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}} - v}$

• Des démonstrations de ce type peuvent être menées pour d'autres situations et permettent de relier Δf et v .

L'effet Doppler constitue une méthode de mesure de valeurs de vitesse.

c. Effet Doppler-Fizeau

Les raies visibles dans le spectre de la lumière venant d'une galaxie sont souvent décalées par rapport à celles mesurées pour une source immobile sur Terre (spectres F).

Le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau permet de calculer la vitesse d'éloignement ou de rapprochement d'une galaxie par rapport à la Terre.

L'essentiel



VIDÉO DE COURS
Le décalage Doppler
QCM
Version interactive

2 Le niveau d'intensité sonore

Calcul de I à partir de L

On utilise la fonction logarithme décimal $x \mapsto \log x$ (pour $x > 0$) qui est la réciproque de la fonction $x \mapsto 10^x$:

Niveau d'intensité sonore L en dB $\rightarrow L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$

Intensité sonore de référence I_0 en $W \cdot m^{-2}$

Intensité sonore I en $W \cdot m^{-2}$: puissance par unité de surface transportée par une onde sonore

Atténuation A en décibel (dB)

Atténuation géométrique liée à la distance parcourue par l'onde sonore

$$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}}$$

Atténuation par absorption liée à la paroi traversée par l'onde sonore

$$A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$$

$$A > 0$$

1 L'effet Doppler

Effet Doppler

Existence d'un décalage entre la fréquence f_E d'une onde émise et la fréquence f_R de l'onde reçue lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie.

Décalage Doppler

$$\Delta f = f_R - f_E$$

Rapprochement de E et R

$$\lambda_R < \lambda_E; T_R < T_E$$

$$f_R > f_E \text{ donc } \Delta f > 0$$



Distance constante entre E et R

$$\lambda_R = \lambda_E; T_R = T_E$$

$$f_R = f_E \text{ donc } \Delta f = 0$$



Éloignement de E et R

$$\lambda_R > \lambda_E; T_R > T_E$$

$$f_R < f_E \text{ donc } \Delta f < 0$$



Établissement de l'expression du décalage Doppler

Chronologie de deux émissions consécutives de signaux et de leurs deux réceptions consécutives.



Expression de T_R en fonction de T_E

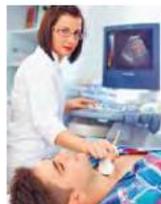


Expression de f_R en fonction de f_E , puis de Δf

Détermination de valeurs de vitesse et de sens de déplacement



Vitesse d'un véhicule



Vitesse d'écoulement du sang

Spectre de référence (source immobile sur Terre)



Galaxie qui s'éloigne



Décalage vers le rouge (redshift)

Vitesse d'éloignement d'une galaxie

VIDÉO DE COURS Le décalage Doppler

QCM

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s), puis vérifier la correction p. 147.

A

B

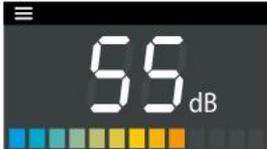
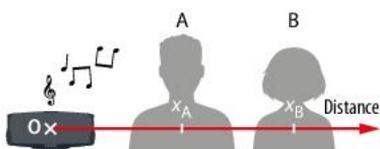
C

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

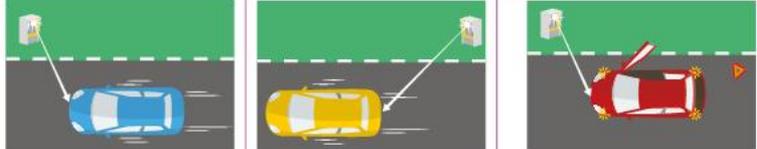
1 Le niveau d'intensité sonore

Si erreur, revoir § 1 p. 95

1. Le niveau d'intensité sonore se mesure en :	W	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	dB
2. Quel est le niveau d'intensité sonore correspondant à cette situation ?  $I = 1,0 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	50 dB	70 dB	77 dB
3. L'intensité sonore correspondant à l'affichage ci-dessous est : 	$1,0 \times 10^{43} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$3,2 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$3,2 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
4. L'atténuation d'un son se mesure en :	m	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	dB
5. 	$I_A > I_B$	$I_A < I_B$	$L_A > L_B$

2 L'effet Doppler

Si erreur, revoir § 2 p. 96

6. Lorsqu'un émetteur d'ondes est en mouvement par rapport à un récepteur :	la fréquence de l'onde reçue est égale à celle de l'onde émise.	la fréquence de l'onde reçue est différente de celle de l'onde émise.	la longueur d'onde de l'onde reçue est différente de celle de l'onde émise.
7. Un émetteur d'ondes se rapproche d'un récepteur fixe. La fréquence f_E de l'onde émise et celle f_R de l'onde reçue sont telles que :	$f_R < f_E$	$f_R > f_E$	$f_R = f_E$
8. Avec les notations de la question précédente, le décalage Doppler est :	$f_R - f_E$	$f_E - f_R$	$f_E + f_R$
9. L'effet Doppler est utilisé pour mesurer :	une durée.	une distance.	une valeur de vitesse.
10. Un radar installé sur le bord d'une route est utilisé pour mesurer la valeur de la vitesse des véhicules. Quelle situation correspond à un décalage Doppler positif ? 			

Les bons réflexes

Si l'énoncé demande de...

Il est nécessaire de...

Calculer une intensité sonore ou un niveau d'intensité sonore à partir de l'autre grandeur.

Réflexe 1

Ex. 5 p. 102

- Rappeler la relation $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
- Isoler la grandeur recherchée et effectuer le calcul en faisant attention aux unités.

Calculer une atténuation ou montrer son existence.

Réflexe 2

Ex. 6 p. 102

- Pour calculer une atténuation, soustraire le niveau d'intensité sonore mesuré après atténuation de celui mesuré avant atténuation.
- Pour montrer l'existence d'une atténuation, comparer deux niveaux d'intensité sonore ou deux intensités sonores.

Décrire et interpréter qualitativement des observations au sujet de l'effet Doppler.

Réflexe 3

Ex. 10 p. 103

- Comparer la fréquence (ou la période ou la longueur d'onde) de l'onde reçue à celle de l'onde émise.
 - En déduire le sens du mouvement relatif du récepteur par rapport à l'émetteur.
- ou
- Observer le sens du mouvement relatif du récepteur par rapport à l'émetteur.
 - Comparer la fréquence (ou la période ou la longueur d'onde) de l'onde reçue à celle de l'onde émise.

Exploiter l'expression du décalage Doppler.

Réflexe 4

Ex. 14 p. 103

- Relever l'expression du décalage fournie ou démontrée précédemment.
- Isoler la grandeur recherchée et effectuer le calcul en faisant attention aux unités.

1 Exercice résolu

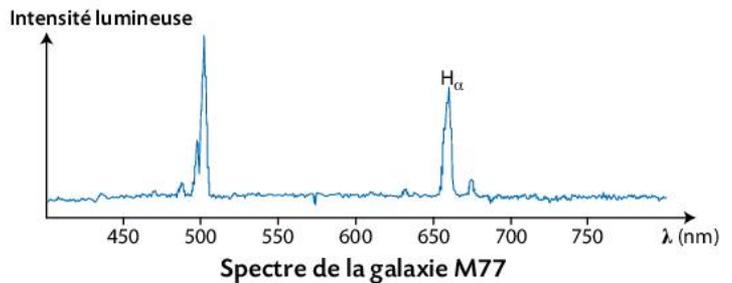
Effet Doppler et astrophysique

Exploiter des informations ; effectuer des calculs ; interpréter des résultats.

La valeur v de la vitesse d'un astre par rapport à la Terre est donnée par la formule de Doppler-Fizeau :

$$v = c \times \frac{|\lambda_{\text{spectre}} - \lambda_{\text{référence}}|}{\lambda_{\text{référence}}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} c : \text{célérité de la lumière dans le vide } (c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ \lambda_{\text{spectre}} : \text{longueur d'onde d'une raie du spectre de la lumière venant de l'astre} \\ \lambda_{\text{référence}} : \text{longueur d'onde de la même raie dans un spectre de référence (spectre obtenu sur Terre)} \end{cases}$$

1. a. Sachant que la longueur d'onde de la raie H_{α} mesurée sur Terre pour une source au repos est de 656 nm, calculer le décalage de longueur d'onde pour la raie H_{α} de la galaxie nommée M77.
- b. Préciser si la galaxie M77 s'éloigne ou se rapproche de la Terre.
2. Calculer la valeur de la vitesse de la galaxie M77 par rapport à la Terre.



Solution rédigée

- On utilise le Réflexe 3.

Comparaison des longueurs d'onde

Déduction du sens du mouvement relatif

1. a. Le spectre de la galaxie M77 permet de trouver la longueur d'onde de la raie H_{α} . Elle vaut $\lambda_{\text{spectre}} = 660 \text{ nm}$.
Le décalage de longueur d'onde est donc :

$$\Delta\lambda = |\lambda_{\text{spectre}} - \lambda_{\text{référence}}| = 660 \text{ nm} - 656 \text{ nm} = 4 \text{ nm}.$$

- b. Comme $\lambda_{\text{spectre}} > \lambda_{\text{référence}}$, la raie H_{α} est décalée vers les grandes longueurs d'onde. La galaxie s'éloigne de la Terre.

- On utilise le Réflexe 4.

Relevé de la formule de décalage fournie

Calcul de v

2. La valeur de la vitesse v de la galaxie M77 par rapport à la Terre est :

$$v = c \times \frac{|\lambda_{\text{spectre}} - \lambda_{\text{référence}}|}{\lambda_{\text{référence}}}$$

$$v = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \frac{|660 \text{ nm} - 656 \text{ nm}|}{656 \text{ nm}} \quad \text{soit } v = 1,7 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

- La valeur de la vitesse d'éloignement est $1,7 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2 Exercice résolu

Sirène d'alarme

Extraire et organiser l'information ; effectuer des calculs.

1. La notice d'une sirène d'alarme indique que l'intensité sonore à 20 m de la sirène est $1,5 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Calculer le niveau d'intensité sonore prévisible à 20 m de la sirène.

2. Un voisin constate qu'à 30 m de la sirène, le niveau d'intensité sonore est 78 dB. Calculer l'atténuation correspondante.

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.



Solution rédigée

On utilise le Réflexe 1.

Rappel de la définition

Calcul

- Le niveau d'intensité sonore est donné par $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
Donc $L = 10 \log\left(\frac{1,5 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) = 82 \text{ dB}$.
À 20 m de la sirène, le niveau d'intensité sonore sera 82 dB.

On utilise le Réflexe 2.

Calcul de l'atténuation

- En passant de 20 m à 30 m de la sirène, le niveau d'intensité sonore a diminué de 82 dB à 78 dB. L'atténuation est donc : $A = 82 \text{ dB} - 78 \text{ dB} = 4 \text{ dB}$.

Côté maths 4 : Utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque

Côté maths

1. En arrondissant au centième, montrer que, pour tout $a > 0$:

$$\log(2a) \approx \log a + 0,30$$

2. Montrer que :

$$a = b \times \log c \Leftrightarrow c = 10^{\frac{a}{b}} \text{ pour } b \neq 0 \text{ et } c > 0.$$

Méthode

1. Vérification de $\log(2a) \approx \log a + 0,30$

• J'utilise la propriété du log pour $a > 0$ et $b > 0$:

$$\log(a \times b) = \log a + \log b$$

En remplaçant b par 2, il vient :

$$\log(a \times 2) = \log a + \log 2$$

• J'utilise la calculatrice en arrondissant au centième :

$$\log 2 \approx 0,30$$

Donc $\log(2a) \approx \log a + 0,30$.

2. Vérification de $a = b \times \log c \Leftrightarrow c = 10^{\frac{a}{b}}$

• Je divise la première équation par b (pour $b \neq 0$ et $c > 0$) :

$$\log c = \frac{a}{b}$$

• J'utilise la propriété $\log c = d \Leftrightarrow c = 10^d$

Comme $\log c = \frac{a}{b}$, alors il vient $c = 10^{\frac{a}{b}}$.

Donc $a = b \times \log c \Leftrightarrow c = 10^{\frac{a}{b}}$ pour $b \neq 0$ et $c > 0$.

Côté physique & chimie

1. Montrer que lorsque l'intensité sonore est multipliée par 2, alors le niveau d'intensité sonore augmente de 3 dB.

2. Calculer l'intensité sonore correspondant à un niveau d'intensité sonore de 75 dB.

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Méthode

1. Le niveau d'intensité sonore est : $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.

• En utilisant la propriété du log pour $a > 0$ et $b > 0$:

$$\log(a \times b) = \log a + \log b$$

En notant L' le niveau d'intensité sonore obtenu, il vient :

$$L' = 10 \log\left(\frac{I \times 2}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) + 10 \log 2 = L + 10 \log 2$$

• Or $10 \log 2 \approx 3$. Donc $L' \approx L + 3$

2. La relation $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ s'écrit aussi $\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{L}{10}$.

• En utilisant la propriété du log pour $c > 0$:

$\log c = d \Leftrightarrow c = 10^d$, il vient $\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}$ et donc $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$.

• $I = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 10^{\frac{75 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}} = 3,2 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

À retenir !

- Pour tous réels a et b strictement positifs, on a : $\log(a \times b) = \log a + \log b$ et $\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b$.
- Pour tous réels c et d avec c strictement positif, on a : $\log c = d \Leftrightarrow c = 10^d$.

Parcours d'exercices CORRIGÉS

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal.
- 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 et d'un émetteur mobile.
- Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées.
- Capacité mathématique : utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque.

Appliquer le cours

3

10 12

14

5

S'entraîner

19

20

21

20

Vers le BAC

26

25

25

25

1 Le niveau d'intensité sonore

3 Calculer un niveau d'intensité sonore

Effectuer des calculs.

Calculer le niveau d'intensité sonore correspondant à chacune des intensités sonores suivantes.

1. $1,2 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

2. $7,3 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

3. $2,3 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Données

$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$, $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

4 Relier L et I

Mobiliser ses connaissances.

1. Sans calcul, relier chaque niveau d'intensité sonore à l'intensité correspondante.

$3,2 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ • 48 dB

$6,3 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ • 85 dB

$6,5 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ • 98 dB

2. Par le calcul, retrouver L pour $I = 3,2 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Données

$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$, $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Côté maths

Côté maths 4, p. 101

5 Utiliser le logarithme décimal

1. Établir l'expression de l'intensité sonore en fonction du niveau d'intensité sonore.

2. Recopier et compléter sans calculatrice ce tableau.

$I (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	L (dB)
1×10^{-5}	
2×10^{-5}	
	60

Données

$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$, $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $\log(2) = 0,3$.

6 Mettre en évidence une atténuation

Mobiliser ses connaissances.

Un niveau d'intensité sonore moyen de 78 dB est enregistré dans un jardin bordant une route. Après construction d'un mur anti-bruit, le niveau d'intensité sonore moyen dans ce jardin est de 67 dB.

- Quel phénomène est mis en évidence ?
- Calculer la grandeur correspondante.

Utiliser le réflexe 2

7 Exploiter une atténuation

Rédiger une explication.

Casque antibruit
A = 33 dB
DELTA PLUS®



Bouchons d'oreilles
A = 26 dB



- Quel sera le niveau d'intensité sonore ressenti par un utilisateur de chacun de ces dispositifs si le niveau d'intensité sonore ambiant est de 95 dB ?

2 L'effet Doppler

VIDÉO Le décalage Doppler – QR Code p. 98

8 Reconnaître l'effet Doppler

Décrire des phénomènes.

- Parmi les situations suivantes, repérer celles qui sont la conséquence de l'effet Doppler.
 - Fréquence d'une note de musique modifiée lorsqu'un musicien accorde son instrument.
 - Niveau sonore de la sirène d'un camion de pompier qui augmente lorsque ce camion se rapproche.
 - Fréquence du son de la sirène modifiée lors du passage d'une ambulance.

9 Illustrer l'effet Doppler

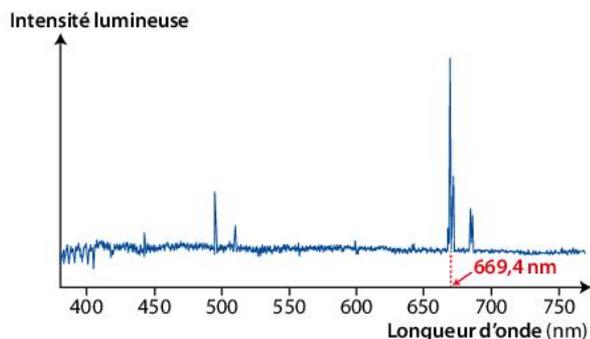
Mobiliser et organiser ses connaissances.

- Citer deux situations mettant en jeu l'effet Doppler.

10 Exploiter qualitativement l'effet Doppler

CORRIGÉ | Interpréter des observations.

Le spectre de la lumière d'une étoile montre une raie de longueur d'onde égale à 669,4 nm.



Avec une source et un capteur immobiles sur Terre, cette raie a une longueur d'onde égale à 656,3 nm.

• Interpréter cette observation. **Utiliser le réflexe 3**

11 Connaître l'effet Doppler

CORRIGÉ | Restituer ses connaissances.

• Associer chaque élément de la colonne de gauche à un élément de la colonne de droite pour comparer les caractéristiques des ondes émises par un émetteur (E) et reçue par un récepteur (R) en mouvement l'un par rapport à l'autre à une vitesse de valeur inférieure à celle de propagation des ondes.

L'émetteur et le récepteur se rapprochent l'un de l'autre.

L'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre.

- $f_R > f_E$
- $f_R < f_E$
- $T_R > T_E$
- $T_R < T_E$
- $\lambda_R > \lambda_E$
- $\lambda_R < \lambda_E$

12 Identifier une expression (1)

CORRIGÉ | Faire preuve d'esprit critique.

Un émetteur d'ondes sonores s'éloigne d'un récepteur avec une vitesse de valeur $v < v_{\text{son}}$. On note f_E la fréquence des ondes émises et f_R la fréquence des ondes reçues.

1. Rappeler l'unité et le signe du décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ dans le cas où l'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre.

2. Parmi les relations suivantes, identifier celle qui donne le décalage Doppler en expliquant pourquoi les trois autres sont incorrectes.

- a) $\Delta f = -f_E \times \frac{v}{v_{\text{son}} + v}$
- b) $\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{\text{son}} - v}$
- c) $\Delta f = \frac{v - v_{\text{son}}}{f_E}$
- d) $\Delta f = \frac{f_E}{f_R} (v - v_{\text{son}})$

13 Identifier une expression (2)

CORRIGÉ | Discuter une formule.

Une étoile s'approche de la Terre avec une vitesse de valeur $0 < v < c$. Le spectre de la lumière de cette étoile comporte une raie de longueur d'onde λ . La même raie obtenue avec une source et un capteur immobiles sur Terre a une longueur d'onde λ_0 .

• Parmi les relations ci-dessous, identifier celle qui donne la valeur de la vitesse de l'étoile par rapport à la Terre en expliquant pourquoi les deux autres sont incorrectes.

- a) $v = c \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda}$
- b) $v = c \times \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0}$
- c) $v = c \times \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$

14 Calculer une valeur de vitesse

CORRIGÉ | Effectuer des calculs.

A Fonctionnement d'un radar

1 Le radar a émis une onde de fréquence $f_E = 3,40 \times 10^{10}$ Hz.

2 Après réflexion sur le véhicule, l'onde est revenue vers le radar.

3 Le radar a mesuré la fréquence f_R de l'onde réfléchi et a exploité le décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ pour déterminer la valeur de la vitesse du véhicule.

Lors du passage d'une voiture, le radar mesure un décalage Doppler $\Delta f = 6,451 \times 10^3$ Hz. Pour ce radar, le décalage Doppler est :

$$\Delta f = \frac{2v \times \cos \alpha}{c} \times f_E$$

Dans cette expression, α est l'angle entre la direction de déplacement du véhicule et l'axe de visée du radar.

• Calculer la valeur de la vitesse du véhicule.

Utiliser le réflexe 4

Données

- Célérité de la lumière : $c = 3,00 \times 10^8$ m · s⁻¹.
- $\alpha = 20^\circ$.

15 Calculer un décalage Doppler

CORRIGÉ | Utiliser un modèle pour prévoir.

Une voiture passe en klaxonnant. Le son produit a une fréquence $f_E = 435$ Hz. Elle s'éloigne d'un piéton avec une vitesse de valeur $v = 80$ km · h⁻¹.

Dans une telle situation, la valeur du décalage Doppler est donnée par :

$$\Delta f = -f_E \times \frac{v}{v_{\text{son}} + v}$$

• Calculer le décalage Doppler perçu par le piéton.

Donnée

Célérité du son : $v_{\text{son}} = 345$ m · s⁻¹.

16 Avant le spectacle

| Effectuer des calculs.

Des mesures réalisées pendant un concert de trois guitaristes sont en partie rassemblées ci-dessous :

	Intensité sonore I ($W \cdot m^{-2}$)	Niveau sonore L (dB)
Guitariste 1	$1,0 \times 10^{-4}$	
Guitariste 2		70
Guitariste 3		
Guitaristes 1 et 3		83

1. Compléter le tableau.
2. Que deviendraient l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore si les trois guitaristes jouaient en même temps ?

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} W \cdot m^{-2}$.

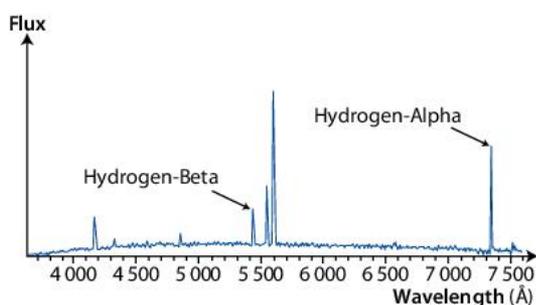
17 The speed of the galaxy Q2125-431

| Pratiquer une langue vivante étrangère.

The Doppler Shift¹ is an important physical phenomenon that astronomers use to measure the radial speeds of distant stars and galaxies. The basic formula for slow-speed motion (speeds much slower than the speed of light) is: $speed = 299\,792 \times \frac{\lambda_0 - \lambda_r}{\lambda_r}$.

We consider that this formula is valid here.

The speed of the object in km/s can be found by measuring the observed wavelength of the object's signal (λ_0), and by knowing that the rest wavelength² of the signal is λ_r , with wavelengths measured in Angstroms, Å ($1 \text{ Å} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$).



This is a small part of the spectrum of Seyfert galaxy Q2125-431 in the Microscopium constellation. An astronomer has identified the spectral lines for Hydrogen Alpha ($\lambda_{r\alpha} = 6\,563 \text{ Å}$), and Beta ($\lambda_{r\beta} = 5\,007 \text{ Å}$). <http://www.nasa.gov>

Vocabulary: 1. *shift*: décalage.

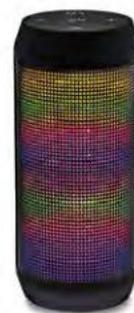
2. *rest wavelength*: longueur d'onde au repos.

1. Calculate the wavelength shift due to the Doppler-Fizeau for rays Hydrogen-Alpha and Hydrogen-Beta.
2. Is Seyfert galaxy Q2125-431 getting closer or further away from Earth?
3. Determine the speed at which galaxy Q2125-431 is moving away or closer to Earth.

18 Enceinte Bluetooth

| Effectuer des calculs.

Une enceinte Bluetooth a une puissance sonore de 0,12 W. On fait l'hypothèse que la puissance sonore émise se répartit de manière homogène sur une demi-sphère de rayon r centrée sur l'enceinte Bluetooth.



1. Déterminer l'intensité sonore I du son perçu par une personne située à 1,0 m de l'enceinte.
2. Déterminer le niveau d'intensité sonore L correspondant.
3. Déterminer le niveau d'intensité sonore L' pour une personne située à 2,0 m de l'enceinte.

Données

- Intensité sonore pour une puissance sonore P répartie sur une surface S : $I = \frac{P}{S}$.
- Surface d'une sphère de rayon r : $S = 4 \times \pi \times r^2$.
- Intensité sonore de référence : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} W \cdot m^{-2}$.

19 Connaître les critères de réussite

Au son de la corne de brume

| Effectuer des calculs.

Les cornes de brume sont utilisées dans le domaine maritime pour signaler un obstacle ou un danger.

Elles peuvent produire un son dont le niveau d'intensité sonore peut atteindre 115 dB.



1. Déterminer l'intensité sonore maximale du son émis par une corne de brume.
2. À 50 m de la corne de brume, l'intensité sonore est égale à $1,0 \times 10^{-4} W \cdot m^{-2}$.
 - a. Déterminer le niveau d'intensité sonore correspondant.
 - b. En déduire l'atténuation géométrique du signal.

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} W \cdot m^{-2}$.

Critères de réussite

J'ai utilisé l'expression littérale de L pour en déduire celle de I (question 1).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
J'ai donné le résultat avec l'unité adaptée (questions 1 et 2).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
J'ai correctement exploité la définition de l'atténuation (question 2. b).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

20 À chacun son rythme

| Exploiter des informations ; effectuer des calculs.

En 1845, afin de vérifier expérimentalement la théorie de Christian DOPPLER, le scientifique Christoph BUYS-BALLOT a réalisé l'expérience suivante : des musiciens à bord d'un train jouent un La de fréquence f_E . Des auditeurs, convenablement disposés le long de la voie ferrée, ont pu reconnaître la note jouée par les musiciens lors de l'approche du train.



Dans cette situation, la relation permettant de calculer la vitesse v d'un émetteur sonore s'approchant d'un observateur immobile est :

$$\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}} - v}$$

$v_{\text{onde}} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ étant la célérité du son dans les conditions de température du jour de l'observation.

Énoncé compact

Déterminer la valeur de la vitesse de déplacement du train.

Énoncé détaillé

1. Quel est le phénomène à l'origine du décalage des fréquences entre l'onde émise et l'onde perçue ?
2. Quelle est la fréquence f_R de la note entendue par les musiciens situés au bord de la voie ferrée ?
3. Calculer la valeur de la vitesse de déplacement du train.

Données

Les définitions des notes de musique ont évolué depuis le XIX^e siècle. Les fréquences actuelles sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Note	Fa	Fa#	Sol	La ^b	La	La#	Si
f (Hz)	349	370	393	415	440	464	494

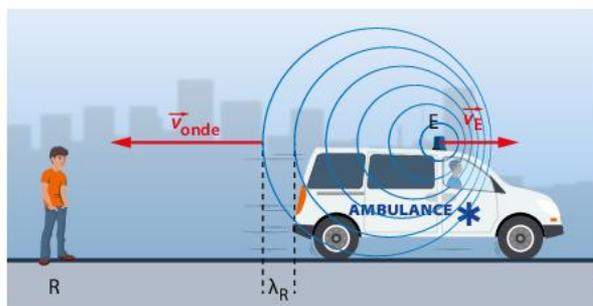
21 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'éloignement d'un émetteur

| Effectuer des calculs ; interpréter des résultats.

L'effet Doppler permet de déterminer la valeur de la vitesse d'un émetteur (E) s'éloignant d'un observateur immobile (R). On se propose de retrouver la relation entre :

- la fréquence f_E d'émission des signaux par E ;
- la fréquence f_R de réception des signaux par R ;
- la valeur v_{onde} de la célérité de l'onde émise par E ;
- la valeur v_E de la vitesse de l'émetteur.

Les valeurs des vitesses sont mesurées dans un référentiel terrestre et $v_E < v_{\text{onde}}$.



1. À l'instant initial $t_1 = 0 \text{ s}$, E est à la distance d de R et émet une onde sonore se propageant à la célérité v_{onde} . Exprimer littéralement la date t_2 au bout de laquelle ce signal est reçu par R.
2. a. Déterminer l'expression de la distance d_E parcourue par l'émetteur pendant une durée égale à une période T_E du signal émis.
b. À la date $t_3 = T_E$, quelle est la distance qui sépare E et R ?
c. À la date $t_3 = T_E$, l'émetteur émet de nouveau un signal. À quelle date t_4 le récepteur R reçoit-il ce signal ?
3. Quelle est la durée, notée T_R , séparant la réception par R de deux signaux consécutifs ? Que représente cette durée T_R ?
4. a. Exprimer la relation entre les fréquences f_R et f_E , la célérité v_{onde} du signal et la valeur v_E de la vitesse de E.
b. Quelle est l'expression littérale de la valeur de la vitesse v_E de l'émetteur ?

22 Avion de chasse

| Tracer un graphique ; effectuer des calculs.

Un avion se déplace à basse altitude à la vitesse subsonique $v = 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, selon une trajectoire rectiligne horizontale. À chaque instant, il émet une onde sphérique qui se propage à la célérité $v_s = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

À l'instant $t_0 = 0 \text{ s}$, un point de l'avion est à la position M_0 de sa trajectoire. À $t_1 = 0,1 \text{ s}$, il est en M_1 ; à $t_2 = 0,2 \text{ s}$, il est en M_2 , etc.

1. Placer le point M_0 au centre d'une feuille de papier millimétré. Porter à l'échelle 1 cm pour 20 m, les positions successives de M_0 à M_6 de l'avion sur sa trajectoire.
2. On analyse le phénomène à la date $t_6 = 0,6 \text{ s}$: l'avion est en M_6 .
a. Si, aux positions M_5, M_4, \dots, M_0 ont été créées des ondes sphériques acoustiques, quelles distances d_5, d_4, \dots, d_0 ont été franchies par ces ondes à la date $t_6 = 0,6 \text{ s}$?
b. À cette date t_6 , tracer au compas les limites circulaires atteintes par ces ondes sphériques (placer chaque fois le centre du cercle à tracer sur la position M_i considérée).
3. Montrer que cette construction met en évidence, pour un observateur terrestre, deux séries d'ondes, une en avant et une autre en arrière de l'avion, dont on comparera les longueurs d'onde apparentes respectives λ' et λ'' .
4. En déduire qu'il en résulte deux sons, de fréquences f' et f'' , dont l'un est plus aigu que l'autre.

Donnée

$$\lambda' = \lambda - \frac{v}{f} \text{ et } \lambda'' = \lambda + \frac{v}{f}$$

23 Résolution de problème

Au concert

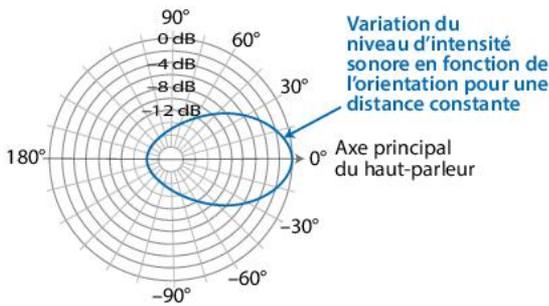
Construire les étapes d'une résolution de problème.

D'après Baccauréat Centres étrangers, 2019

La sonorisation d'un concert est assurée par une enceinte posée sur la scène.

Le niveau d'intensité sonore mesuré à 2,0 m de l'enceinte, sur son axe principal, est 110 dB.

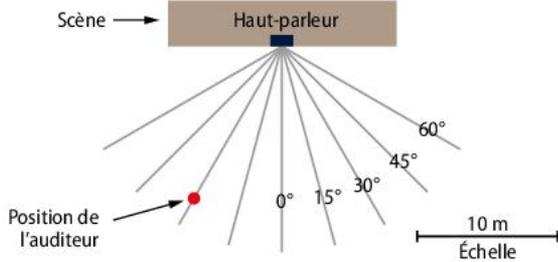
A Diagramme d'émission du haut-parleur



Exemple de lecture : pour un angle de 15°, il y a une diminution de 2 dB par rapport à la direction 0°.

On suppose que ce diagramme est utilisable pour toutes les fréquences audibles par les spectateurs lors du concert.

B Schématisation de la salle de concert



C Les dangers des sons

Les seuils de dangerosité pour l'oreille dépendent du niveau d'intensité sonore et de la durée d'exposition.

Les normes internationales définissent le seuil : 85 dB pendant 8 heures. Ce seuil augmente de 3 dB à chaque fois que la durée d'exposition est divisée par 2.

D'après le site www.hcsp.fr

L'auditeur positionné sur le schéma B de la salle peut-il écouter un concert de deux heures en toute sécurité ?

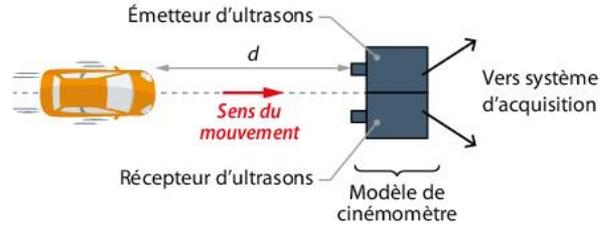
Donnée

L'intensité sonore I (en $W \cdot m^{-2}$) est inversement proportionnelle au carré de la distance d (en m) à la source : $I = \frac{k}{d^2}$ où k est une constante caractéristique du haut-parleur.

24 Contrôle de vitesse

Exploiter des graphiques et schémas ; effectuer des calculs.

Un radar pédagogique contrôle par effet Doppler la valeur de la vitesse instantanée des véhicules automobiles. Un élève cherche à modéliser le principe de la mesure. Son expérience est représentée ci-dessous.



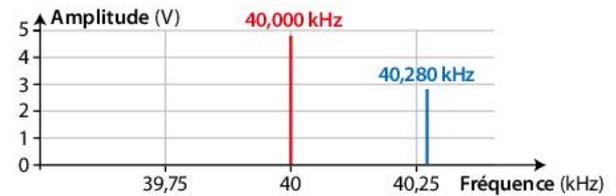
1. a. Donner le principe de fonctionnement de ce dispositif.

b. On note f_E la fréquence de l'onde émise et f_R celle de l'onde reçue par le récepteur.

Lors d'un tel mouvement, f_E est-elle supérieure ou inférieure à f_R ?

2. On réalise l'acquisition informatisée des signaux émis et reçus. Le logiciel permet de repérer les fréquences de chacun des signaux.

Déterminer f_E et f_R .



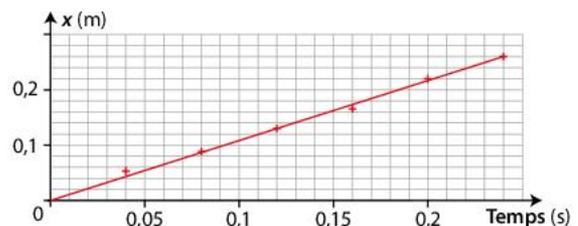
3. Déterminer, parmi les relations ci-dessous, celle qui donne la valeur de la vitesse v de la voiture, mesurée par rapport au sol et inférieure à celle de l'onde notée v_S .

a $f_R = f_E \times \left(2v + \frac{v}{v_S}\right)$ b $f_R = v \times \left(f_E - \frac{2v}{v_S}\right)$

c $f_R = f_E \times \left(1 - \frac{2v}{v_S}\right)$ d $f_R = f_E \times \left(\frac{2v}{v_S} + 1\right)$

4. La célérité des ondes ultrasonores v_S est égale à $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Calculer la valeur de la vitesse v de la voiture.

5. Le déplacement de la voiture a été filmé, puis on a représenté l'évolution de sa position x en fonction du temps.



a. En déduire la valeur $v_{\text{vidéo}}$ de la vitesse de la voiture.

b. Conclure en comparant les valeurs v et $v_{\text{vidéo}}$.

Ne pas confondre I et L



Intensité sonore en $W \cdot m^{-2}$ $I \neq L$ Niveau d'intensité sonore en dB

Manipuler les puissances de 10

$$10^{(a+b)} = 10^a \times 10^b$$

$$10^{(a-b)} = \frac{10^a}{10^b}$$

Pour $a > 0$,
 $10^{\log a} = \log(10^a) = a$

Utiliser la bonne touche

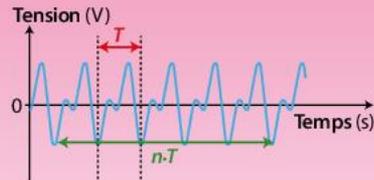
Sur la calculatrice, pour le logarithme décimal :

oui \rightarrow **log** **ln** \leftarrow non

Valider le signe du décalage Doppler

Ne pas oublier que Δf a un signe !

Pour déterminer une période



Mesurer $n \cdot T$ (plutôt qu'une seule période) est plus précis.

Préparation à l'écrit

→ Les bons réflexes 1, 2, 3 et 4 sont présentés p. 100

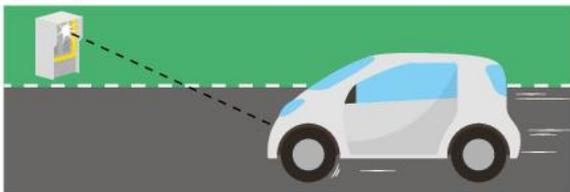
25 50 min Effet Doppler et contrôle de vitesse

Exploiter des mesures ; effectuer des calculs ; estimer une incertitude de mesure ; proposer d'éventuelles améliorations de la démarche.

Un radar de mesure de vitesse est constitué d'un émetteur et d'un récepteur d'ondes électromagnétiques.

Les ondes émises par le radar se réfléchissent sur le véhicule dont on souhaite mesurer la valeur de la vitesse. Les ondes réfléchies sont captées par le récepteur. L'analyse des ondes émises et reçues permet de déterminer la valeur de la vitesse de déplacement du véhicule par rapport au radar.

A Principe de la mesure



Le radar émet une onde électromagnétique de fréquence f_E de l'ordre de 10^{10} Hz et de célérité c . On note v la valeur de la vitesse du véhicule, en direction du radar. Pour simplifier l'étude de la situation, on considère que le radar est positionné en face de la voiture. Dans la réalité, il est toujours décalé puisqu'il est sur le bord de la route.

Partie I Effet Doppler et détermination de vitesse à partir de la fréquence de l'onde reçue

1. La fréquence f_1 des ondes reçues par le véhicule en mouvement a pour expression $f_1 = f_E \times \frac{c+v}{c}$.

- Vérifier que cette expression est homogène.
- Exprimer le décalage Doppler et montrer que son signe est en accord avec la situation étudiée.

Utiliser le réflexe 3

2. Le véhicule en mouvement réfléchit ensuite l'onde. Il se comporte alors comme un émetteur d'onde de fréquence f_1 se déplaçant à la vitesse de valeur v . Le radar capte l'onde réfléchie.

- Établir l'expression de la fréquence f_R des ondes reçues par le radar en fonction de v , c et f_1 .
- En déduire l'expression de f_R en fonction de v , c et f_E .
- Dans le cas où v est très inférieure à c , montrer que le décalage Doppler est donné par : $\Delta f = 2f_E \times \frac{v}{c}$.

3. Le radar est prévu pour mesurer des valeurs de vitesses de l'ordre de $10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- Quel est l'ordre de grandeur de Δf pour cette vitesse ?

Utiliser le réflexe 4

b. La mesure de v doit être réalisée avec une incertitude-type de l'ordre de $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

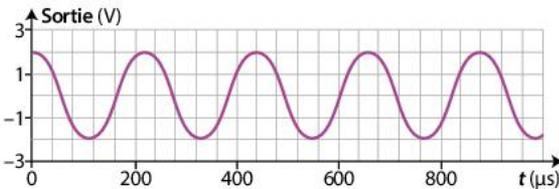
La fréquence f_E est supposée connue précisément. Quel est l'ordre de grandeur de la précision nécessaire sur Δf ?

c. Dans le cas où Δf serait mesuré directement à partir des fréquences f_E et f_R , expliquer pourquoi il ne serait pas possible d'obtenir une détermination de la valeur de la vitesse à $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ près.

Partie II Décalage Doppler et détermination de vitesse

Pour déterminer avec précision la valeur de la vitesse de déplacement, le radar combine électroniquement les ondes émises (de fréquence f_E l'ordre de 10^{10} Hz) et les ondes reçues. Le signal obtenu en sortie du dispositif a une fréquence égale à la valeur absolue du décalage Doppler. Il est reproduit ci-dessous.

B Signal obtenu



1. **a.** Déterminer la période du signal obtenu.
- b.** L'incertitude-type sur T est estimée à $10 \mu\text{s}$. Déterminer la valeur absolue du décalage Doppler et évaluer son incertitude-type.

2. À partir du document **A**, déterminer le signe de Δf .

Utiliser le réflexe 3

3. **a.** En déduire la valeur v de la vitesse du véhicule et son incertitude-type si $f_E = 3,0 \times 10^{10} \text{ Hz}$.

b. Dans la liste ci-dessous, identifier les méthodes possibles pour améliorer la précision de la détermination de la valeur de la vitesse d'un véhicule.

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| Augmenter f_E | Diminuer f_E |
| Augmenter $u(\Delta f)$ | Diminuer $u(\Delta f)$ |

Donnée

Lorsque $A = k \times B$ avec k connu précisément, alors $\frac{u(A)}{A} = \frac{u(B)}{B}$.

26 40 min Niveau sonore et scène de concert

Effectuer des calculs ; construire les étapes d'une résolution de problème.



Pour contrôler le niveau d'intensité sonore lors d'un concert, un technicien a placé une première enceinte au bord de la scène. Un son est produit avec une puissance sonore égale à $4,0 \times 10^{-1} \text{ W}$.

On fait l'hypothèse que le son est uniformément réparti sur une demi-sphère de rayon r centrée sur l'enceinte.

1. **a.** Déterminer l'intensité sonore du son reçu par un spectateur placé à $1,0 \text{ m}$ de l'enceinte.

b. Que devient cette intensité si le spectateur est placé à $4,0 \text{ m}$ de l'enceinte ?

Utiliser le réflexe 1

2. **a.** Déterminer le niveau d'intensité sonore dans les deux cas et comparer ces deux niveaux entre eux.

Utiliser le réflexe 2

b. Déterminer l'atténuation géométrique correspondante.

3. Le technicien place ensuite une deuxième enceinte identique à la première à côté de celle-ci. Les deux enceintes sont à $4,0 \text{ m}$ du spectateur.

a. Déterminer le niveau sonore du son reçu par le spectateur dans cette nouvelle situation.

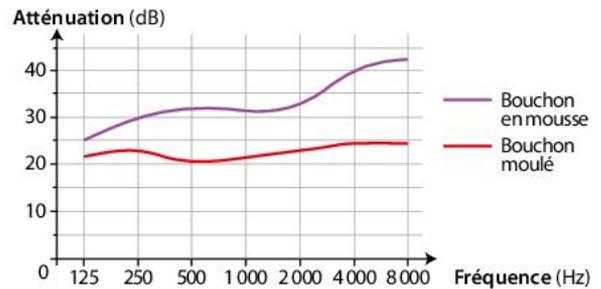
Utiliser le réflexe 1

b. Pour la durée d'un concert, le seuil de danger est estimé à 90 dB .

À quelle distance doit se positionner le spectateur pour éviter tout souci auditif ?

Coup de pouce QR code p. 98

Les bouchons anti-bruit sont utilisés pour limiter le niveau d'intensité sonore tout en gardant la qualité du son. Le graphique ci-dessous représente les courbes d'atténuation d'un bouchon en mousse et d'un bouchon moulé.



4. **a.** Pourquoi dit-on qu'avec des bouchons en mousse, le son perçu est plus grave que le son émis ?

b. Cet effet est-il aussi marqué pour un bouchon moulé ?

c. Indiquer le type de bouchon antibruit le mieux adapté lors d'un concert.

Données

- Intensité sonore pour une puissance sonore P répartie sur une surface S : $I = \frac{P}{S}$.
- Surface d'une sphère de rayon r : $S = 4 \times \pi \times r^2$.
- Intensité de référence : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

7

Diffraction et interférences



Les couleurs d'une plume de paon dépendent de sa structure finement divisée.

- Comment expliquer les variations des couleurs selon l'incidence de la lumière ?

➤ Rendez-vous : exercice 24 p. 124

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. **Activité 1 p. 110**
- Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. **Activité 2 p. 111**
- Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image. **Activité 2 p. 111**
- Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. **Activité 3 p. 112 et exercice 9 p. 120**
- 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. **Exercice 18 p. 122**
- 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. **Activité 3 p. 112**

Activité expérimentale 1

Le phénomène de diffraction

Notions

- Diffraction
- Angle caractéristique de diffraction

Derrière un mur insonorisé, à proximité d'une porte ouverte, il est possible de suivre un discours sans voir l'orateur. C'est une conséquence du phénomène de diffraction.

► **Objectif de l'activité :** Qu'est-ce que le phénomène de diffraction ?



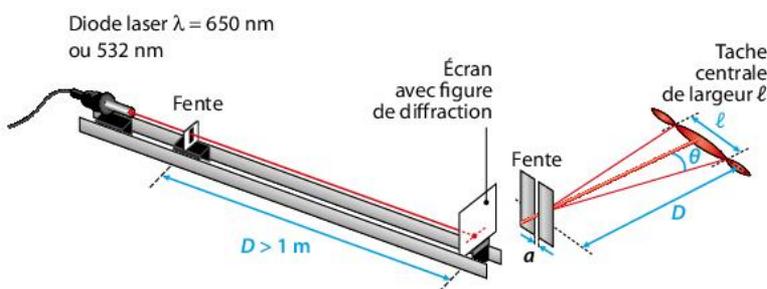
A Phénomène de diffraction

- Le phénomène de diffraction se manifeste lorsqu'une onde mécanique ou électromagnétique passe au travers d'une ouverture de petite dimension.
- L'importance de ce phénomène est déterminée par l'angle caractéristique de diffraction θ . Cet angle est lié à la taille a de l'ouverture et à la longueur d'onde λ de l'onde incidente.

B Onde lumineuse

La lumière de longueur d'onde λ issue d'un laser peut subir un changement de direction de propagation après avoir rencontré une fente de largeur a .

Le phénomène de diffraction se manifeste avec des dimensions de l'ouverture diffractante pouvant aller jusqu'à 100 fois la longueur d'onde de l'onde incidente.



C Onde mécanique

La houle peut subir un changement de direction de propagation après avoir rencontré une ouverture, entre des digues par exemple.



Le phénomène de diffraction se manifeste lorsque les dimensions de l'ouverture diffractante sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde incidente.

MATÉRIEL DISPONIBLE



Pratique expérimentale

Élaborer et mettre en œuvre un protocole ANA-RAIS-REA

- À partir du matériel disponible, proposer et mettre en œuvre un protocole pour déterminer comment varie l'angle caractéristique de diffraction θ quand :
 - la taille de l'ouverture augmente.
 - la longueur d'onde augmente.

Mettre en lien des phénomènes et des concepts VAL

- À partir des observations expérimentales, choisir parmi les propositions ci-dessous celle qui convient :
 - $\sin \theta = \lambda \times a$
 - $\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$
 - $\sin \theta = \frac{a}{\lambda}$

Rédiger une explication COM

- Un son produit par l'orateur cité en introduction a une fréquence égale à 800 Hz. L'ouverture de la porte mesure 1,0 m. Justifier qu'il est possible d'entendre ce son sans voir l'orateur. On prendra $v_{\text{son}} = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Un pas vers le cours

Rédiger une explication COM

- Qu'est-ce que le phénomène de diffraction ?

Activité 2 expérimentale

La diffraction d'une lumière monochromatique

Notion

Angle caractéristique de diffraction

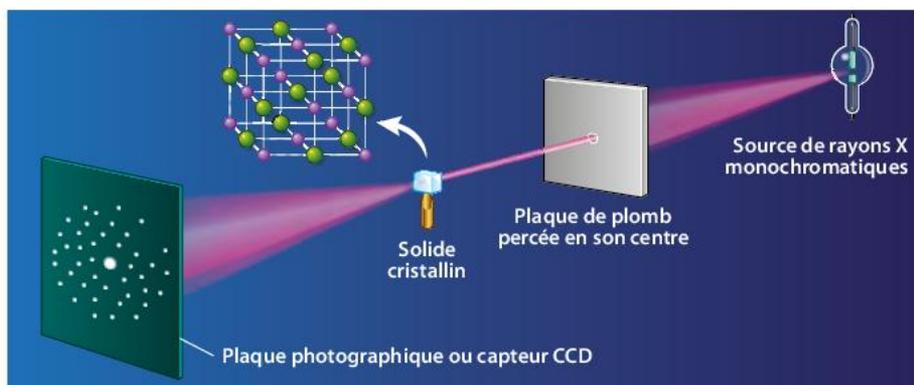
Un diffractomètre, comme son nom l'indique, utilise le phénomène de diffraction pour notamment mesurer des distances à l'échelle microscopique.

► **Objectif de l'activité :** Comment déterminer une distance à partir du phénomène de diffraction ?

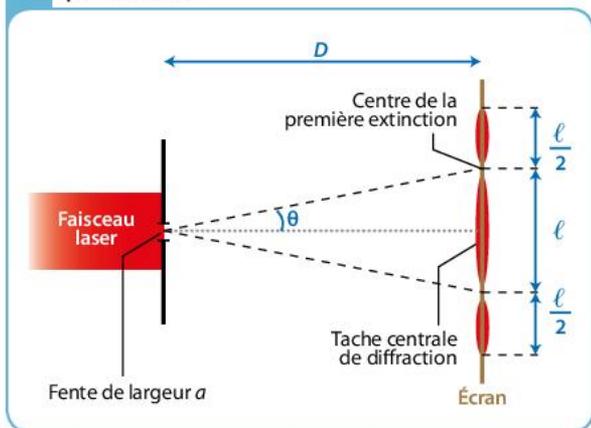


A Cristallographie

La cristallographie aux rayons X est une technique adaptée à la détermination de la structure des cristaux et de la distance entre les atomes. Cette technique repose sur le phénomène de diffraction.



B Schématisation de la diffraction de la lumière par une fente



COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

• L'angle caractéristique de diffraction θ est lié à la taille a de l'ouverture et à la longueur d'onde λ de la radiation. C'est un angle aigu et positif, l'expression de son sinus est :

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

λ et a étant exprimées dans la même unité de longueur.

• Pour de petits angles, exprimés en radian, on peut utiliser l'approximation $\sin \theta = \theta$.

L'expression de θ s'écrit alors :

$$\theta \text{ en rad} \rightarrow \theta = \frac{\lambda}{a} \quad \begin{array}{l} \lambda \text{ en m} \\ a \text{ en m} \end{array}$$

• Pour de petits angles, exprimés en radian, on peut aussi utiliser l'approximation $\tan \theta = \theta$.

• La distance D séparant la fente de l'écran est choisie très grande pour améliorer la précision des mesures.

Pratique expérimentale

Extraire et organiser l'information APP

1 À l'aide du schéma B et du COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE, exprimer l'angle caractéristique de diffraction θ en fonction des grandeurs ℓ et D .

Élaborer et mettre en œuvre un protocole ANA-RAIS-REA

2 Proposer, puis mettre en œuvre, un protocole expérimental pour déterminer la largeur d'une fente.

Mettre en lien des phénomènes et des concepts VAL

3 Quel est l'objet diffractant dans l'étude de la cristallographie aux rayons X ?

Un pas vers le cours

Rédiger une explication COM

4 Comment déterminer une distance à partir du phénomène de diffraction ?

Activité expérimentale

3

Les interférences lumineuses

Notions

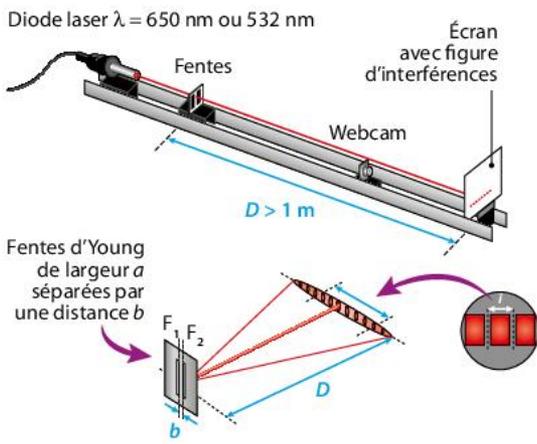
Interférences de deux ondes lumineuses
Interfrange

En 1803, Thomas YOUNG fait passer un faisceau lumineux à travers deux fines fentes très proches taillées dans un cache placé à proximité d'un écran. Il observe sur cet écran une succession de raies sombres et brillantes : c'est la signature d'un phénomène d'interférences lumineuses.

► **Objectif de l'activité :** Comment exploiter le phénomène d'interférences pour déterminer la longueur d'onde d'une radiation ?

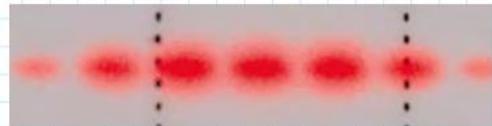
Tâche complexe

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

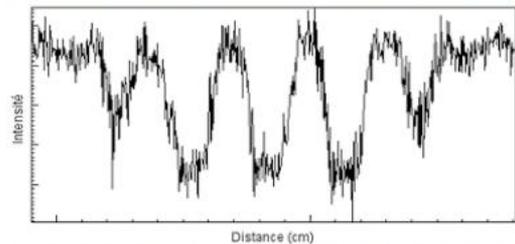


PROTOCOLE

✓ RÉALISER une photographie de la figure sur un écran quadrillé.

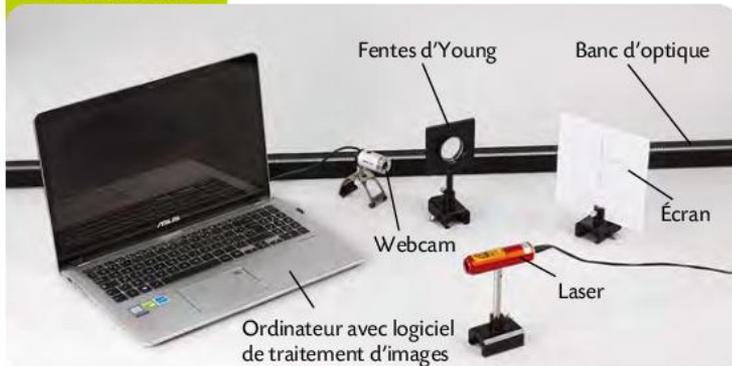


✓ UTILISER un logiciel de traitement d'images pour mesurer l'interfrange :



Les zones éclairées différemment correspondent à des intensités différentes après analyse par le logiciel.

MATÉRIEL DISPONIBLE



COMPLÈMENT SCIENTIFIQUE

On appelle interfrange i la distance séparant les centres de deux franges brillantes consécutives ou les centres de deux franges sombres consécutives (voir DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL). i est liée aux grandeurs expérimentales par la relation :

$$i = \frac{\lambda \times D}{b}$$

avec λ en m, D en m, b en m, et i en m.

Étapes de la démarche de résolution

1. RELIRE les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter.
2. REFORMULER le problème en utilisant un vocabulaire scientifique.
3. ÉMETTRE une hypothèse permettant d'y répondre.
4. ÉLABORER un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée.
5. NOTER les observations, les interpréter et conclure.

Investigation

APP · ANA · RAIS · RÉA · VAL · COM

- 1 À partir du matériel proposé, identifier l'indication de l'étiquette du laser disponible que l'on peut contrôler. Procéder à ce contrôle.

Un pas vers le cours

Rédiger une explication COM

- 2 Comment exploiter le phénomène d'interférences pour déterminer la longueur d'onde d'une radiation ?

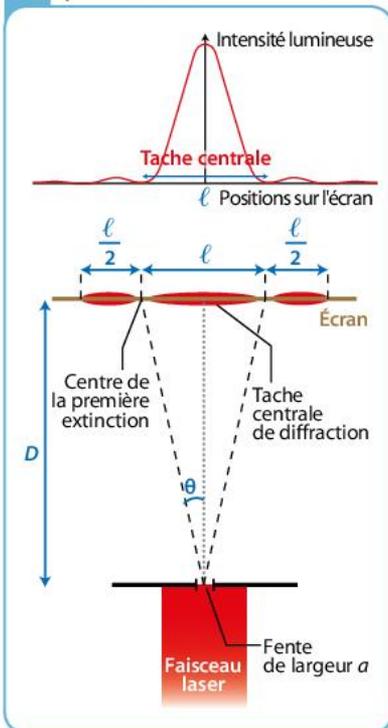
1 La diffraction

a. Conditions d'observation et caractéristiques

A Phénomène de diffraction de la houle

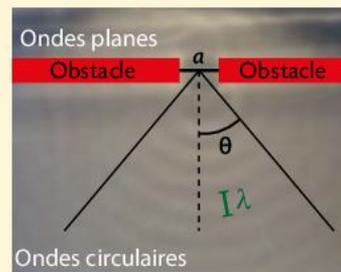
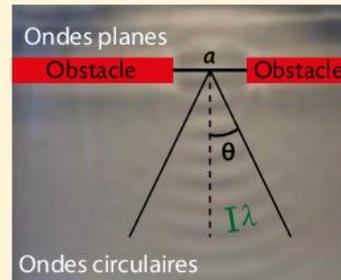


B Diffraction de la lumière par une fente



- Lorsqu'une onde mécanique ou lumineuse rencontre une ouverture sans changer de milieu, on peut observer un changement de direction de propagation de l'onde (photographie A) : c'est le phénomène de diffraction. La longueur d'onde reste inchangée si le milieu est homogène.

Le **phénomène de diffraction**, changement de direction de propagation d'une onde, s'observe lorsque les dimensions de l'ouverture sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde pour une onde mécanique, voire de plusieurs dizaines de longueurs d'onde pour une onde lumineuse.



L'importance du phénomène de diffraction peut être mesurée à l'aide de l'angle caractéristique de diffraction θ .

- Sur la figure de diffraction d'ondes lumineuses monochromatiques par une fente, l'angle qui caractérise ce phénomène est pointé du centre de la tache centrale, la plus lumineuse, au centre de la première raie sombre (ou extinction) observée (schéma B).

- Dans le cas d'une ouverture rectangulaire de largeur a , le sinus de l'angle caractéristique de diffraction θ , aigu et positif, a pour expression :

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

λ en m (pointing to the numerator) and a en m (pointing to the denominator)

Si le rapport $\frac{\lambda}{a}$ est petit, on fait l'approximation $\sin \theta = \theta$ (θ en radian) :

$$\theta \text{ en rad} \rightarrow \theta = \frac{\lambda}{a}$$

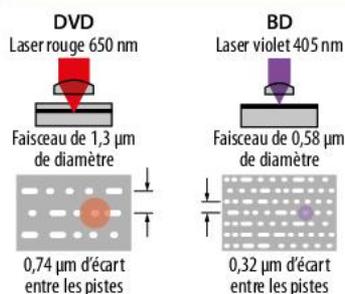
λ en m (pointing to the numerator) and a en m (pointing to the denominator)

- Pour les ondes lumineuses, dans le cas d'une ouverture circulaire de diamètre d et d'un rapport $\frac{\lambda}{d}$ petit :

$$\theta \text{ en rad} \rightarrow \theta = 1,22 \times \frac{\lambda}{d}$$

λ en m (pointing to the numerator) and d en m (pointing to the denominator)

C Lecture optique et diffraction

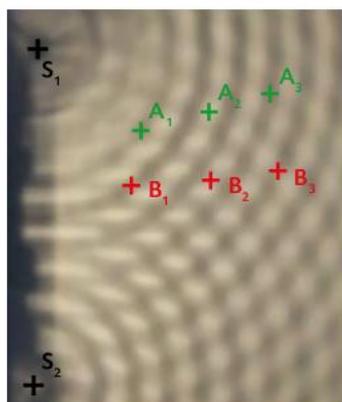


b. Situations de diffraction

Le phénomène de diffraction intervient dans de nombreuses situations physiques : lecture optique, cristallographie, astronomie, acoustique...

- Sur un Blu-ray Disc (BD), l'augmentation de la capacité de stockage, par rapport à un DVD, nécessite des pistes plus serrées. Or le faisceau laser qui permet la lecture est élargi par diffraction et peut déborder sur deux pistes attenantes. Il faut donc utiliser une radiation avec la plus petite longueur d'onde possible (schémas C).
- En astronomie, la monture des objectifs diffracte la lumière reçue : pour une bonne résolution, il faut augmenter leur diamètre.

D Interférences à la surface de l'eau d'une cuve à ondes



> Interférences constructives (A_1, A_2, A_3) et destructives (B_1, B_2, B_3).

2 Les interférences

a. Conditions d'observation

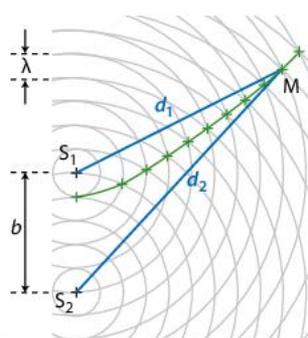
- Deux vibreurs, jouant le rôle de sources ponctuelles, oscillent au-dessus de la surface de l'eau d'une cuve à ondes (schéma D), de manière synchrone, avec la même fréquence f et un déphasage (différence de phase) constant. Il en résulte la propagation de deux ondes progressives circulaires qui se superposent pour donner une figure d'interférences.
- On observe des zones fortement agitées (par exemple points A_1, A_2 et A_3) et d'autres zones peu agitées (par exemple points B_1, B_2 et B_3). C'est le **phénomène d'interférences**.

Des **interférences** s'obtiennent avec des **ondes de même fréquence** et présentant un **déphasage constant**. Les sources qui émettent ces ondes sont des **sources ponctuelles en phase**.

b. Interférences constructives et destructives

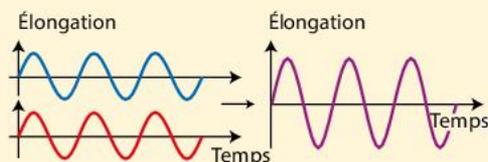
- À la surface de l'eau, les interférences constructives correspondent à la superposition de deux ondes en phase, c'est-à-dire d'élongations toutes deux maximales ou toutes deux minimales (schéma E).

E Interférences constructives



> Les lieux des points tels que $d_2 - d_1 = \lambda, d_2 - d_1 = 2\lambda$, etc. ou $d_2 - d_1 = -\lambda, d_2 - d_1 = -2\lambda$, etc. constituent les franges de forte amplitude.

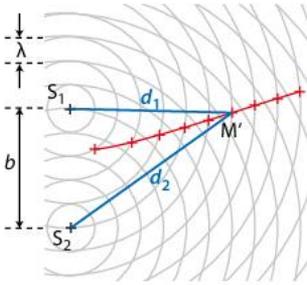
Il y a **interférences constructives** quand deux ondes de longueur d'onde λ , se déplaçant dans un milieu homogène et provenant de deux **sources ponctuelles en phase**, arrivent **en phase** en un point. Leur déphasage $\Delta\varphi$ est alors un multiple pair de π .



L'amplitude de l'onde résultante est alors supérieure à celle des ondes de départ.

En un point M où les interférences sont constructives (schéma E), parviennent des ondes qui ont parcouru les distances $d_1 = S_1M$ et $d_2 = S_2M$ de sorte que : $d_2 - d_1 = k \times \lambda$, avec k entier relatif. C'est la **condition d'interférences constructives**.

F Interférences destructives



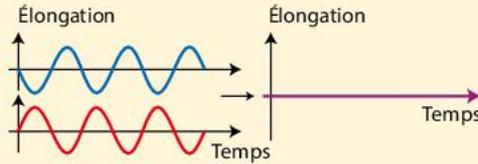
Les lieux des points tels que $d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{2}, d_2 - d_1 = \frac{3\lambda}{2}, \text{etc.}$
ou $d_2 - d_1 = -\frac{\lambda}{2}, d_2 - d_1 = -\frac{3\lambda}{2}, \text{etc.}$
constituent les franges d'amplitude nulle.

Remarque

En d'autres points où les interférences ne sont ni constructives ni destructives, on observe des ondes d'amplitude intermédiaire.

- À la surface de l'eau, les interférences destructives correspondent à la superposition de deux ondes en opposition de phase, c'est-à-dire l'une d'élongation maximale et l'autre d'élongation minimale (schéma D).

Il y a **interférences destructives** quand deux ondes de longueur d'onde λ , se déplaçant dans un milieu homogène et provenant de deux **sources ponctuelles en phase**, arrivent en **opposition de phase** en un point. Leur déphasage $\Delta\varphi$ est alors un multiple impair de π .



L'amplitude de l'onde résultante est alors nulle.

En un point M' où les interférences sont destructives (schéma F), parviennent des ondes qui ont parcouru les distances $d_1 = S_1M'$ et $d_2 = S_2M'$ de sorte que : $d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$ avec k entier relatif.

C'est la **condition d'interférences destructives**.

c. Les interférences de deux ondes lumineuses monochromatiques

- Pour observer une figure d'interférences stable avec de la lumière, il faut éclairer deux trous (ou deux fentes) avec une unique source lumineuse monochromatique.

Ces trous, dits sources secondaires, émettent alors des ondes de même fréquence et de déphasage constant ; ils jouent le rôle de **sources ponctuelles en phase**.

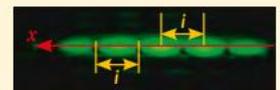
- Deux ondes lumineuses émises par les sources secondaires S_1 et S_2 se superposent en un point P de l'écran après avoir parcouru les distances S_1P et S_2P (schéma G). Cette superposition est à l'origine des interférences que l'on peut observer sur un écran.

Si les ondes arrivent **en phase** en P , les interférences sont **constructives**. On observe alors des **franges brillantes**.

Si elles arrivent **en opposition de phase** en P , les interférences sont **destructives**. On observe alors des **franges sombres**.

d. Interfrange

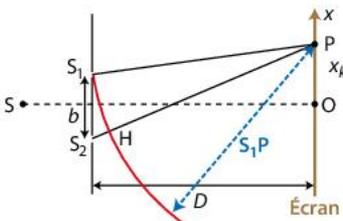
L'**interfrange** i est la distance séparant les centres de deux franges brillantes ou sombres consécutives.



Pour mesurer l'interfrange, il est préférable de travailler avec des franges sombres (voir par exemple le repérage à gauche sur la photographie figure d'interférences données ci-dessus).

À partir de l'expression de l'interfrange, on peut déterminer des longueurs et des longueurs d'onde.

G Superposition de deux ondes



lycee.hachette-education.com/physique-si/tle



VIDÉO DE COURS



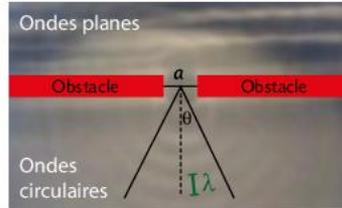
VIDÉO DE COURS
Conditions
d'interférences
QCM
Version interactive

1 La diffraction

Diffraction : changement de direction de propagation de tout type d'onde lors de la traversée d'une ouverture.

Conditions d'observation

Dimensions maximales de l'ouverture :
– du même ordre de grandeur que λ
pour les ondes mécaniques ;
– égales à quelques dizaines de longueurs
d'onde pour les ondes lumineuses.



Domaines d'intervention

Cristallographie, astronomie,
lecture optique, acoustique,
etc.

Angle caractéristique de diffraction θ (aigu et positif)

- Dans le cas d'une ouverture de largeur a :

$$\sin \theta = \frac{\lambda^{(m)}}{a^{(m)}}$$

- Si le rapport $\frac{\lambda}{a}$ est petit : $\theta^{(rad)} = \frac{\lambda^{(m)}}{a^{(m)}}$.

- Pour une onde lumineuse, et dans le cas
d'une ouverture circulaire de diamètre d :

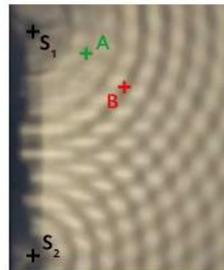
$$\theta^{(rad)} = 1,22 \times \frac{\lambda^{(m)}}{d^{(m)}}$$

2 Les interférences

Interférences : superposition d'ondes de même type en un point.

Conditions d'observation

Ondes de même fréquence
et de déphasage $\Delta\varphi$ constant
qui se superposent.



Domaines d'intervention

Couleurs de certains objets,
brouillage de signaux radio,
protection sonore, etc.

Interférences constructives et destructives

Interférences constructives au point **A** :

- Arrivée de deux ondes **en phase** en ce point
($\Delta\varphi$ multiple pair de π).
- Amplitude de l'onde résultante maximale.
- $S_2A - S_1A = k \times \lambda$ avec $k \in \mathbb{Z}$

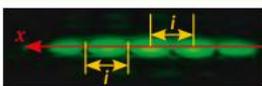
Interférences destructives au point **B** :

- Arrivée de deux ondes **en opposition de phase** en ce point
($\Delta\varphi$ multiple impair de π).
- Amplitude de l'onde résultante nulle.
- $S_2B - S_1B = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$ avec $k \in \mathbb{Z}$

Observation de **franges brillantes** en un point **P** si les
interférences sont **constructives**.

Observation de **franges sombres** en un point **P** si les
interférences sont **destructives**.

Interfrange i



Interfrange = distance séparant les centres de deux franges brillantes
ou sombres consécutives.

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s), puis vérifier la correction p. 147.

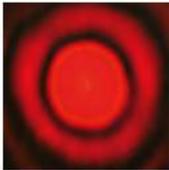
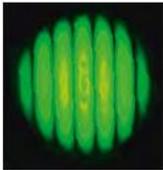
A

B

C

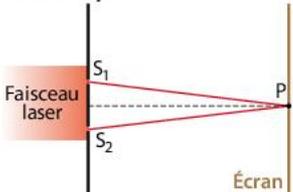
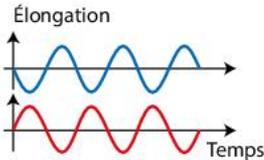
1 La diffraction

Si erreur, revoir § 1 p. 113

1. Le phénomène de diffraction peut être observé avec des ondes :	lumineuses.	sonores.	à la surface de l'eau.
2. Le phénomène de diffraction d'une onde mécanique apparaît lorsqu'une onde :	est absorbée	change de milieu de propagation	rencontre une ouverture
3. Une figure dans laquelle la diffraction est le seul phénomène qui intervient peut être :			
4. Pour limiter l'étendue du phénomène de diffraction, il faut : 	choisir des troncs d'arbre de plus grand diamètre	rapprocher les troncs d'arbre	éloigner les troncs d'arbre
5. Une onde sonore de longueur d'onde 68 cm traverse une ouverture de 1,0 m. L'angle caractéristique de diffraction θ est :	$\theta = 0,68 \text{ rad}$	$\theta = 43^\circ$	$\theta = 43 \text{ rad}$

2 Les interférences

Si erreur, revoir § 2 p. 114

6. Le phénomène d'interférences est observable avec des ondes :	lumineuses.	sonores.	à la surface de l'eau.
7. Des interférences constructives s'observent :	si les ondes qui interfèrent sont en opposition de phase.	si les ondes qui interfèrent sont en phase.	quel que soit le déphasage des ondes qui interfèrent.
8. Des interférences lumineuses stables se produisent à partir :	de deux sources de même intensité.	de deux sources ponctuelles en phase.	d'une source éclairant un système formé de deux fentes proches.
9. Deux ondes lumineuses interfèrent au point P. En ce point : 	les interférences sont constructives.	les interférences sont destructives.	on observe une frange brillante.
10. On a représenté l'évolution temporelle de deux ondes qui interfèrent en un point P. En ce point, l'amplitude de l'onde résultante est : 	supérieure à l'amplitude des ondes initiales.	nulle.	quelconque.

Les bons réflexes

Si l'énoncé demande de...

Calculer un angle caractéristique de diffraction ou la longueur d'onde de l'onde diffractée ou la dimension d'une ouverture.

Il est nécessaire de...

Réflexe 1

- **Rappeler** la relation adéquate définissant l'angle caractéristique en fonction des données du problème.
- **Isoler** la grandeur recherchée et effectuer le calcul en faisant attention aux unités.

→ Ex. 7 p. 120

Prévoir les lieux d'interférences constructives ou destructives.

Réflexe 2

- **Repérer** l'expression de la différence $d_2 - d_1$ des distances parcourues par les deux ondes en un point considéré.
- **Comparer** $d_2 - d_1$ à $k \times \lambda$ ou à $(k + \frac{1}{2}) \times \lambda$.

→ Ex. 11 p. 121

Exploiter l'expression de l'interfrange.

Réflexe 3

- **Identifier** ce que représentent les différentes grandeurs utilisées dans l'expression.
- **Isoler** la grandeur recherchée et effectuer le calcul en faisant attention aux unités.

→ Ex. 15 p. 121

1 Exercice résolu

Diffraction de la lumière

| Exploiter un graphique ; confronter un modèle à des résultats expérimentaux ; effectuer des calculs.

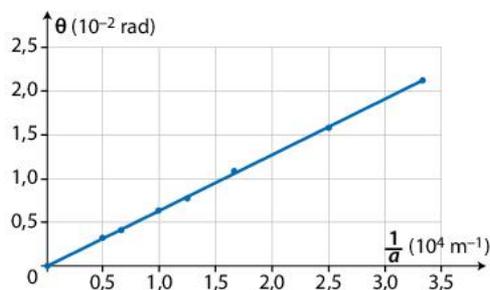
On réalise une expérience de diffraction à l'aide d'un laser émettant une radiation de longueur d'onde λ .

Face au laser, on place successivement des fentes verticales de largeurs a connues. Pour chacune des fentes, on mesure la largeur ℓ de la tache centrale de la figure de diffraction observée sur un écran.

À partir de ces mesures, il est possible de calculer l'angle caractéristique de diffraction θ .

On donne ci-contre la représentation graphique $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$.

1. À quelle condition le phénomène de diffraction est-il observable ?
2. a. Donner la relation liant θ , λ et a en précisant les unités des grandeurs utilisées.
b. Montrer que la fonction qui modélise la courbe obtenue est en accord avec la réponse à la question précédente.
c. À partir de l'expression de la fonction modélisant la courbe, déterminer la longueur d'onde de la radiation du laser utilisé.



Solution rédigée

- On utilise le Réflexe 1.

Rappel de la relation, adaptée à l'expérience, entre les grandeurs θ , a et λ

Isolement et calcul de la grandeur recherchée

1. On observe le phénomène de diffraction si la largeur de chacune des fentes n'est pas trop grande devant la longueur d'onde de la radiation émise.

2. a. L'angle caractéristique de diffraction θ est exprimé en radian et petit d'après le graphique. Ainsi, $\theta = \frac{\lambda}{a}$ avec λ et a exprimées dans la même unité.

b. La courbe $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$ est une droite passant par l'origine, c'est la représentation d'une fonction linéaire d'équation $\theta = k \times \frac{1}{a}$. Au cours des mesures, la longueur d'onde λ de la radiation ne varie pas. L'expression $\theta = \frac{\lambda}{a}$ confirme l'allure de la courbe.

c. Par comparaison de $\theta = k \times \frac{1}{a}$ et $\theta = \frac{\lambda}{a}$, il vient que $\lambda = k$ où k est le coefficient directeur de la droite.

$$k = \frac{2,0 \times 10^{-2} \text{ rad} - 0 \text{ rad}}{3,15 \times 10^4 \text{ m}^{-1} - 0 \text{ m}^{-1}} = 6,3 \times 10^{-7} \text{ m},$$

soit une longueur d'onde de 630 nm.

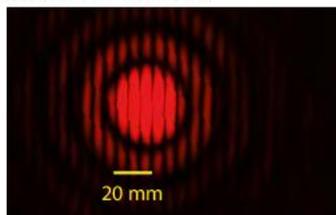
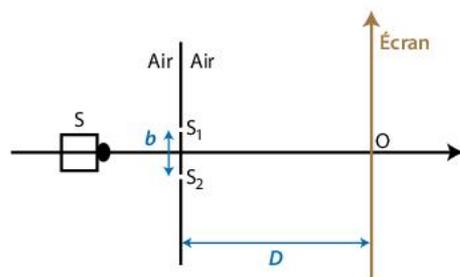
2 Exercice résolu

Détermination d'un interfrange

| Mobiliser et organiser ses connaissances ; effectuer des calculs.

On utilise comme source une diode laser émettant une radiation de longueur d'onde $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$. Une plaque, percée de deux trous d'Young distants de $b = 0,20 \text{ mm}$ et de même diamètre, est placée à une distance $D = 2,0 \text{ m}$ de l'écran.

On observe la figure d'interférences ci-dessous.



1. Quelles sont les conditions nécessaires pour observer le phénomène d'interférences ?
2. Au point O, la frange est-elle brillante ou sombre ? Justifier.
3. a. Par analyse dimensionnelle, choisir la bonne expression de l'interfrange i parmi les suivantes :

$$(1) i = \frac{\lambda_0 \times b}{D}$$

$$(2) i = \lambda_0 \times b \times D$$

$$(3) i = \frac{\lambda_0}{b \times D}$$

- b. Déterminer l'interfrange i .
 - c. Retrouver ce résultat à l'aide de la figure d'interférences.
4. Comment mesurer la longueur d'onde de la radiation émise par un laser à l'aide du dispositif des trous d'Young ?

Solution rédigée

- On utilise le Réflexe 2.

Repérage de la différence de distance parcourue

Comparaison de la différence des distances parcourues et de $k \times \lambda$

1. Des interférences sont observées avec des ondes de même fréquence issues de sources ponctuelles que l'on obtient expérimentalement à l'aide d'ouvertures éclairées par une même source. C'est le cas du dispositif des trous d'Young.

2. En O, les ondes partant de S_1 et S_2 ont parcouru des distances identiques depuis les deux trous d'Young. La condition d'interférences constructives $d_2 - d_1 = k \times \lambda_0$ est vérifiée avec $k = 0$. La frange est brillante.

3. a. Comme l'interfrange s'exprime en mètre, on élimine les relations (2) et (3) dans lesquelles le membre de droite s'exprime respectivement en m^3 et m^{-1} . La relation (1), homogène, est la bonne expression.

b. D'après la relation (1), $i = \frac{\lambda_0 \times b}{D}$.

$$i = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m} \times 2,0 \text{ m}}{0,20 \times 10^{-3} \text{ m}} = 6,5 \times 10^{-3} \text{ m}, \text{ soit } i = 6,5 \text{ mm}.$$

c. On mesure cinq interfranges au niveau de la tache centrale de la figure. On obtient une longueur 1,6 fois plus grande que la longueur du segment d'échelle. Cela permet de calculer l'interfrange i :

$$i = \frac{1,6 \times 20 \text{ mm}}{5}, \text{ soit } i = 6,4 \text{ mm}.$$

On retrouve bien l'interfrange calculé aux erreurs de mesure près.

- On utilise le Réflexe 3.

Identification des termes de la formule de l'interfrange

Isolement de la grandeur recherchée

4. L'interfrange i est donné par la formule $i = \lambda_0 \times \frac{D}{b}$. D est la distance entre les deux trous d'Young et l'écran ; λ_0 est la longueur d'onde de la radiation émise par le laser ; b est la distance entre les deux trous d'Young.

À partir de la formule de l'interfrange, on déduit $\lambda_0 = \frac{b \times i}{D}$. La mesure de l'interfrange, celle de D et la connaissance de b permettent de déterminer la longueur d'onde λ_0 .

Parcours d'exercices CORRIGÉS

Ce que je dois savoir et savoir faire

	Appliquer le cours	S'entraîner	Vers le BAC
■ Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes.	5		
■ Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.	7	19	26
■ Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes.	9	18	26
■ 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 et prévoir les lieux d'interférences.	11	18	26
■ Exploiter l'expression de l'interfrange.	15	17	27

1 La diffraction

3 Identifier le phénomène de diffraction (1)

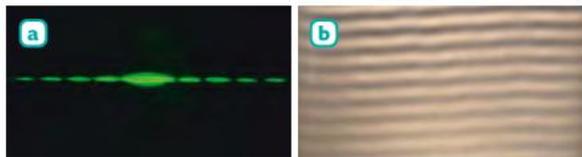
Mobiliser et organiser ses connaissances.

- Décrire la figure obtenue sur un écran placé à quelques mètres d'une fente de petite largeur éclairée par un laser.

4 Identifier le phénomène de diffraction (2)

Interpréter des observations.

- Identifier, dans les situations ci-dessous, celle dans laquelle le phénomène de diffraction intervient.



5 Illustrer le phénomène de diffraction

Mobiliser ses connaissances.

- Citer deux exemples de la vie courante dans lesquels le phénomène de diffraction intervient.

6 Connaître un phénomène

Interpréter des phénomènes.



Un mur antibruit, d'une hauteur de 3 m, et de surface bien réfléchissante ou absorbante vis-à-vis d'une onde sonore, n'isole pas totalement les riverains du bruit de la circulation lorsqu'il présente une petite ouverture.

- Quel phénomène permet de l'expliquer ?

7 Calculer un angle caractéristique de diffraction

Faire un schéma adapté.

En éclairant une ouverture de diamètre $d = 30 \mu\text{m}$ à l'aide d'une radiation de longueur d'onde $\lambda = 532 \text{ nm}$, on obtient sur un écran une figure de diffraction.

1. Schématiser le dispositif expérimental.
2. Calculer l'angle caractéristique de diffraction θ .

Utiliser le réflexe 1

Donnée

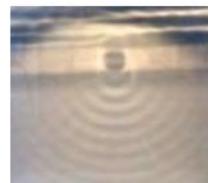
$$\theta = 1,22 \times \frac{\lambda}{d}$$

8 Exploiter l'angle caractéristique de diffraction

Effectuer des calculs.

On étudie la diffraction d'une onde à la surface de l'eau.

θ (rad)	0,50	0,82
λ (cm)		1,7
a (cm)	2,7	



- Recopier et compléter ce tableau.

Donnée

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

2 Les interférences

9 Reconnaître le phénomène d'interférences

Mobiliser et organiser ses connaissances.

- Parmi les situations suivantes, repérer celle qui met en jeu un phénomène d'interférences.

- a) Casque antibruit qui émet des ondes sonores en opposition de phase avec le bruit ambiant.
- b) Discours entendu derrière une porte entrouverte.

10 Décrire un phénomène d'interférences

↓ Décrire des phénomènes.

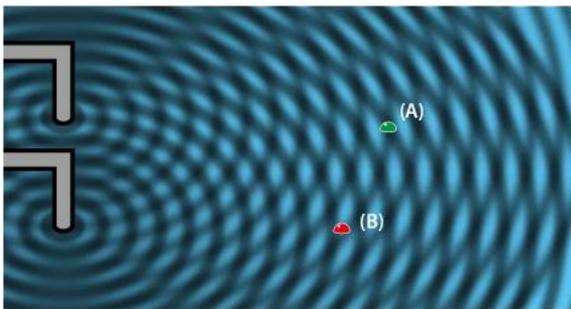
Une source de lumière monochromatique éclaire deux trous d'Young. Un écran est placé à quelques mètres.

1. Comment se nomme le phénomène observé ?
2. Décrire la figure observée sur l'écran.

11 Reconnaître des ondes

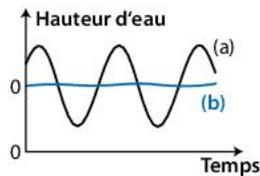
CORRIGÉ ↓ Exploiter un schéma.

Deux vibreurs frappent la surface de l'eau d'une cuve à ondes et donnent naissance à des interférences. On place deux flotteurs (A) et (B) sur ce plan d'eau.



1. À quelle condition peut-on observer le phénomène d'interférences ?

2. On représente ci-contre la hauteur d'eau sous les flotteurs en fonction du temps. Attribuer, à chaque flotteur (A) et (B), la courbe (a) ou (b) qui lui correspond.

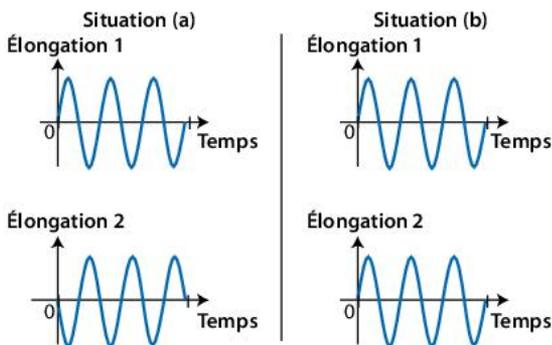


Utiliser le réflexe 2

12 Reconnaître des signaux en phase ou en opposition de phase

↓ Tracer un graphique.

Deux ondes se propagent depuis deux sources S_1 et S_2 pour se croiser en un point P. Deux situations possibles sont représentées ci-dessous.



1. Dans quel cas les ondes sont-elles en opposition de phase au point P ? en phase ?
2. Dessiner, dans chacun des deux cas, l'élongation de l'onde résultante en fonction du temps.

3 Les interférences de deux ondes lumineuses monochromatiques

VIDÉO DE COURS Conditions d'interférences – QR Code p. 116

13 Connaître le phénomène d'interférences

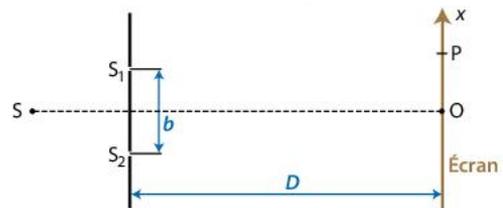
CORRIGÉ ↓ Mobiliser ses connaissances.

1. Quelle(s) condition(s) doivent remplir des sources lumineuses pour qu'il y ait des interférences ?
2. Quelle condition la différence de distances parcourues entre deux ondes doit-elle respecter pour observer :
 - a. des interférences constructives ?
 - b. destructives ?

14 Positionner des franges

↓ Décrire des phénomènes.

On réalise une expérience d'interférences avec un système de deux fentes d'Young éclairées par une source de radiation de longueur d'onde $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$.



1. Qu'observe-t-on sur l'écran au point O ?
2. Les ondes arrivent en P avec une différence de distance parcourue $d_2 - d_1 = 1,625 \mu\text{m}$. Qu'observe-t-on en P ?

15 Calculer une longueur d'onde

CORRIGÉ ↓ Effectuer des calculs.

On réalise une figure d'interférences lumineuses à l'aide de fentes d'Young séparées par une distance $b = 0,20 \text{ mm}$. La figure est obtenue sur un écran situé à $D = 2,0 \text{ m}$.

- Calculer la longueur d'onde de la lumière utilisée sachant que, dans les conditions de l'expérience, on mesure $i = 6,3 \text{ mm}$.

Utiliser le réflexe 3

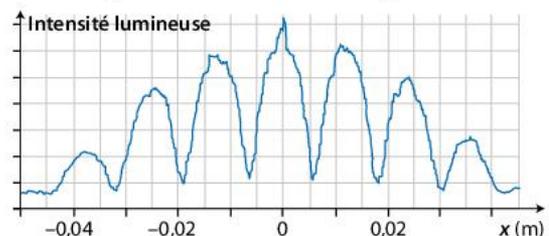
Donnée

$$\text{Interfrange } i = \frac{\lambda \times D}{b}$$

16 Calculer un interfrange

↓ Exploiter un graphique.

Une figure d'interférences est photographiée et analysée avec un logiciel de traitement d'images.

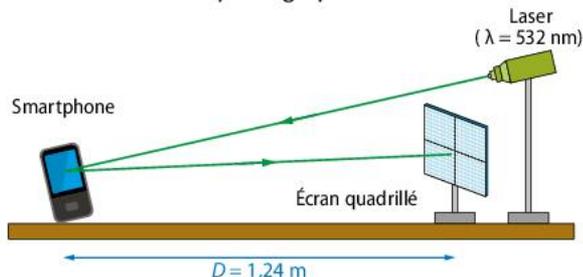


- Déterminer l'interfrange i .

17 Mesure de la taille d'un pixel d'un écran de smartphone

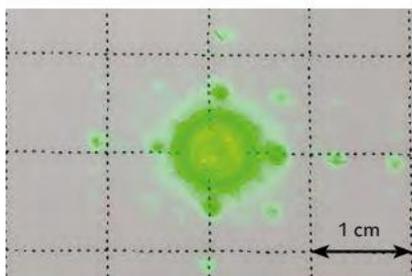
Exploiter des informations ; effectuer des calculs.

Lors d'une séance de travaux pratiques, un élève envoie un faisceau laser sur son smartphone éteint. Il voit apparaître sur l'écran situé à une distance D du smartphone plusieurs taches lumineuses. Il photographie l'écran.



Un écran de téléphone portable est constitué de pixels (points lumineux). Un phénomène de diffraction se produit lorsque le faisceau laser rencontre un obstacle suffisamment petit, le pixel, de taille a . Un pixel joue le même rôle qu'une ouverture de même taille lors de la diffraction.

L'interfrange i est donné par la relation : $i = \frac{\lambda \times D}{a}$.

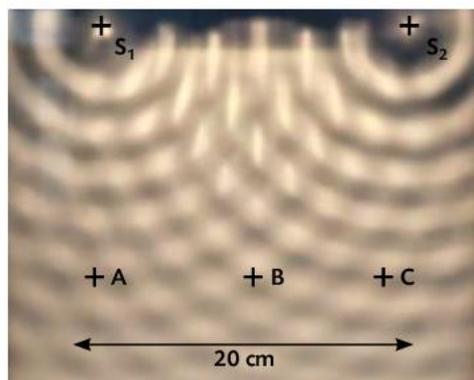


- Mesurer l'interfrange i .
- Calculer la largeur d'un pixel.

18 Interférences à la surface de l'eau

Exploiter une photographie ; faire preuve d'esprit critique et argumenter.

Des ondes issues de deux sources ponctuelles en phase interfèrent à la surface de l'eau d'une cuve à ondes. Chaque source produit une onde de longueur d'onde λ . La photographie ci-dessous montre la figure obtenue.



- Déterminer graphiquement la longueur d'onde λ .
- À partir des données du tableau suivant, caractériser l'amplitude de l'onde résultante aux points A, B et C.

Point	A	B	C
Distance depuis S_1 (cm)	14,9	17,4	22,6
Distance depuis S_2 (cm)	24,1	17,4	14,9

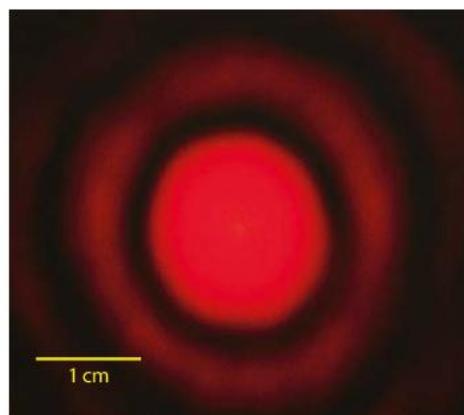
19 Connaître les critères de réussite

Pointeur laser

Procéder à des analogies ; effectuer des calculs.

On dispose d'un pointeur laser émettant, dans l'air, des radiations rouges de longueur d'onde λ_R .

On souhaite vérifier expérimentalement la longueur d'onde λ_R . Pour cela, on réalise un montage permettant d'obtenir une figure de diffraction à travers une ouverture circulaire de rayon $r = 0,20$ mm sur un écran placé à une distance $D = 5,0$ m. La figure obtenue est la suivante :



- Schématiser le montage du dispositif expérimental.
- En utilisant le schéma, exprimer la longueur d'onde λ_R en fonction de la distance D , du rayon r de l'ouverture et de la largeur ℓ de la tache centrale.
- Calculer la longueur d'onde des radiations émises par la diode laser du pointeur rouge.
- Dans les mêmes conditions, on utilise un laser émettant, dans l'air, des radiations de longueur d'onde $\lambda = 405$ nm.
 - Quelle est la couleur de la radiation émise par le laser utilisé ?
 - Comment la largeur de la tache centrale évolue-t-elle ?

Donnée

L'angle θ étant petit et en radian, on a $\tan \theta = \theta$.

Critères de réussite

- | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|
| J'ai réalisé un schéma propre et légendé (question 1). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| J'ai utilisé mes connaissances et le schéma pour exprimer la longueur d'onde en fonction des paramètres de l'expérience (question 2). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| J'ai effectué le calcul en faisant attention aux unités (question 3). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| J'ai utilisé l'expression de la longueur d'onde pour répondre (question 4). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

20 À chacun son rythme

Les effets de la houle

Utiliser un modèle pour prévoir ; effectuer des calculs ; rédiger une explication.

Commencer par résoudre l'énoncé compact. En cas de difficultés, passer à l'énoncé détaillé.



Des vagues de 1 m de hauteur, parallèles les unes par rapport aux autres, et espacées de 30 m, atteignent la digue d'un port de plaisance. Elles peuvent traverser la passe large de 40 m qui fait face aux vagues. Deux bateaux sont au mouillage près du rivage.

Énoncé compact

Y a-t-il un bateau mieux protégé que l'autre par la digue ?

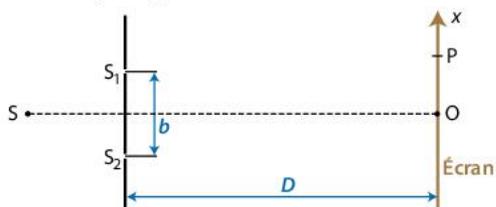
Énoncé détaillé

1. Indiquer la longueur d'onde de la houle et la taille de l'ouverture.
2. a. Pourquoi le phénomène de diffraction doit-il être pris en compte ?
b. Calculer l'angle caractéristique de diffraction θ .
c. Reproduire, à l'échelle, le schéma et y faire apparaître l'angle caractéristique de diffraction.
3. Y a-t-il un bateau mieux protégé que l'autre par la digue ?

21 Interfrange et longueur d'onde

Effectuer des calculs ; estimer une incertitude de mesure.

Une source de lumière monochromatique de longueur d'onde λ_0 éclaire deux fentes étroites S_1 et S_2 , distantes de b . On a $SS_1 = SS_2$.



$i = (6,0 \pm 0,1) \text{ mm} ; D = (2,00 \pm 0,01) \text{ m} ; b = (0,20 \pm 0,01) \text{ mm}$.

Le point P, d'abscisse x_k , est un point de l'écran proche de O. Cet écran est suffisamment éloigné des sources pour que $D \gg b$ et $D \gg x_k$.

L'interfrange i est donnée par la relation : $i = \lambda_0 \times \frac{D}{b}$.

1. a. Calculer la longueur d'onde λ_0 de la radiation émise par le laser étudié.
b. Évaluer son incertitude-type à partir des mesures expérimentales.
2. En déduire un encadrement de la longueur d'onde λ_0 .

Données

- Interfrange : $i = (6,0 \pm 0,1) \text{ mm}$.
- Distance fentes-écran : $D = (2,00 \pm 0,01) \text{ m}$.
- Distance entre les fentes : $b = (0,20 \pm 0,01) \text{ mm}$.
- Incertitude-type sur la mesure de la longueur d'onde λ_0 :

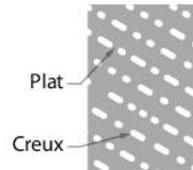
$$u(\lambda_0) = \lambda_0 \times \sqrt{\left(\frac{u(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{u(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}$$

22 Lecture d'un disque optique Blu-ray

Utiliser un modèle pour prévoir, décrire et expliquer.

D'après Baccalauréat Nouvelle-Calédonie, 2013

Sur un disque optique (CD, DVD, Blu-ray), les données sont gravées sous forme de minuscules cavités, de longueur variable, appelées « creux ». Les espaces entre les creux sont appelés « plats ».

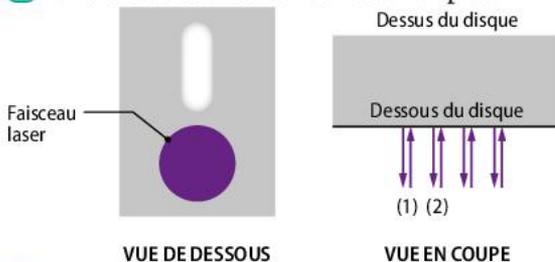


Afin de lire les données, un faisceau laser est dirigé vers le disque optique. Le faisceau se propage dans du polycarbonate puis se réfléchit et est renvoyé vers un capteur qui détecte l'intensité lumineuse réfléchie.

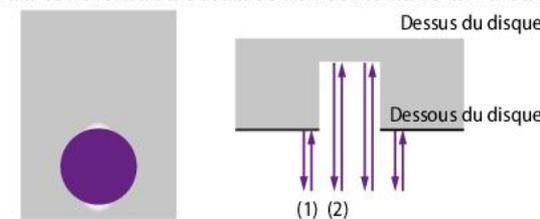
La variation d'intensité lumineuse au cours de la lecture permet de décoder l'information numérique. Les diodes lasers utilisées dans les lecteurs Blu-ray émettent une lumière de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 405 \text{ nm}$.

A Lecture des données sur le disque optique

a Le faisceau laser se réfléchit sur un plat.



b Le faisceau laser est positionné en face d'un creux : le rayon (1) situé au bord du faisceau se réfléchit sur un plat, tandis que le rayon (2) situé au centre du faisceau se réfléchit dans un creux.



1. À quelle condition des interférences sont-elles constructives ? destructives ?
2. a. Dans le cas a, les interférences entre les rayons (1) et (2) sont-elles constructives ? Destructives ?
b. Dans le cas b, la différence de distance $d_2 - d_1$ entre les rayons (1) et (2) est $d_2 - d_1 = 2h$.

Que représente h ? Calculer sa valeur minimale pour que les interférences soient destructives sachant que dans un matériau d'indice n la longueur d'onde est $\frac{\lambda_0}{n}$.

Donnée

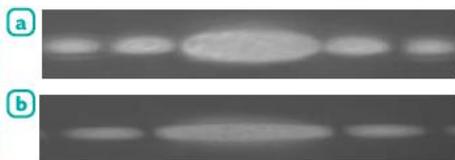
- Indice du polycarbonate : $n = 1,55$

23  **Wavelength influence on diffraction**

| Pratiquer une langue vivante étrangère.

During a diffraction experiment, picture **a** was obtained.

By simply changing the laser, picture **b** was the new result.



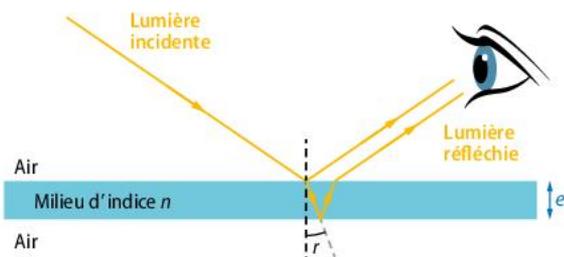
1. Which shot corresponds to the longer wavelength laser?
2. The wavelength of light from one of the lasers is 650 nm and both lasers emit radiation in the visible area. What is the wavelength of the second laser?

24 **Couleurs interférentielles des paons**

| Effectuer des calculs ; argumenter.

Les couleurs de certains insectes et de plumes d'oiseaux (comme le paon) proviennent d'interférences lumineuses.

Leurs plumes sont constituées d'un empilement de petites lames transparentes qui réfléchissent la lumière. Pour comprendre le phénomène, une lame de plume sera modélisée par un parallélépipède transparent d'épaisseur e et d'indice de réfraction n , placé dans l'air. Le schéma ci-après représente cette lame en coupe.



Les deux rayons réfléchis par la lame à faces parallèles se superposent sur la rétine de l'observateur et y interfèrent. Pour un angle de réfraction r donné, le déphasage $\Delta\phi$ entre ces deux ondes dépend de l'épaisseur e de la lame et de son indice de réfraction n .

Il est donné par :

$$\Delta\phi = \frac{4\pi \times n \times e \times \cos r}{\lambda_0} + \pi$$

L'indice n dépend de la longueur d'onde de la radiation.

1. Dans le cas où le déphasage est égal à 2π , les interférences sont-elles constructives ou destructives ? Même question dans le cas où $\Delta\phi = 3\pi$.

2. Un observateur regarde un paon. L'angle de réfraction est $r = 20^\circ$.

a. Déterminer si les interférences de deux rayons sont constructives ou destructives pour :

- une radiation de longueur d'onde dans l'air λ_{OR} (rouge) ;
- une radiation de longueur d'onde dans l'air λ_{OV} (violet).

b. Laquelle des couleurs sera principalement perçue ?

3. La couleur observée serait-elle la même si on changeait l'angle d'observation ?

Données

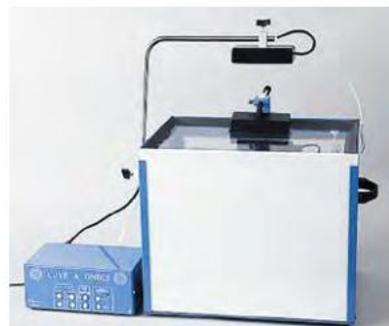
- Longueur d'onde : $\lambda_{OR} = 750$ nm (rouge) ; $\lambda_{OV} = 380$ nm (violet).
- Indice de réfraction d'une lame : $n_R = 1,33$ (rouge) ; $n_V = 1,34$ (violet).
- Épaisseur du milieu : $e = 0,15$ μm .

25  **Résolution de problème**

Cuve à ondes

| Construire les étapes d'une résolution de problème.

Une cuve à ondes est un dispositif permettant de former et d'analyser des ondes progressives périodiques à la surface de l'eau. Des ondes sont produites grâce à un excitateur avec une fréquence f de 20 Hz et se propagent avec une célérité v de 30 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Elles traversent une ouverture de taille a égale à 2,0 cm.



A Photographie des ondes incidentes



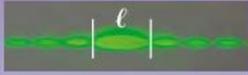
B Caractéristiques d'une onde diffractée

L'onde diffractée est circulaire. Elle garde la même fréquence et la même longueur d'onde que l'onde incidente.

- Représenter, le plus précisément possible, la figure de diffraction après l'ouverture.

Ne pas confondre figure de diffraction et figure d'interférences

Diffraction



Tache centrale large entourée de taches latérales moins intenses et moins larges.

Interférences

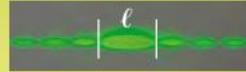


Petites taches de même largeur à l'intérieur de la tache centrale.

Lire une figure de diffraction ou d'interférences

La mesure sur des figures se fait toujours d'un milieu sombre à un milieu sombre correspondant à un minimum d'intensité.

Diffraction

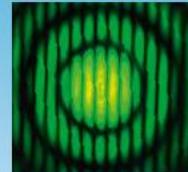


Interférences



Distinguer les deux phénomènes dans une même figure

En pratique, lorsqu'on réalise une figure d'interférences avec des trous d'Young, cette figure est incluse dans une tache de diffraction beaucoup plus large.



Préparation à l'écrit

→ Les bons réflexes 1, 2 et 3 sont présentés p. 118

26 CORRIGE 60 min

Observation d'une exoplanète

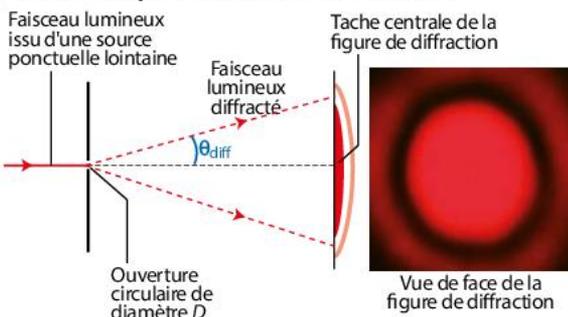
Extraire et organiser l'information ; effectuer des calculs.

D'après Baccalauréat Antilles-Guyane, 2017

Partie I

Les exoplanètes (planètes en dehors du système solaire) sont difficiles à détecter de par leur éloignement et leur manque de luminosité par rapport aux étoiles autour desquelles elles tournent. L'observation de détails avec un télescope terrestre est principalement limitée par le phénomène de diffraction lié à l'ouverture circulaire d du télescope. La première exoplanète dont on a pu faire une image par observation directe dans le proche infrarouge s'appelle 2M1207b. Cette exoplanète orbite à une distance estimée à 55 unités astronomiques (ua) autour de l'étoile 2M1207a, située elle-même à 230 années-lumière (al) de la Terre.

A Diffraction par une ouverture circulaire



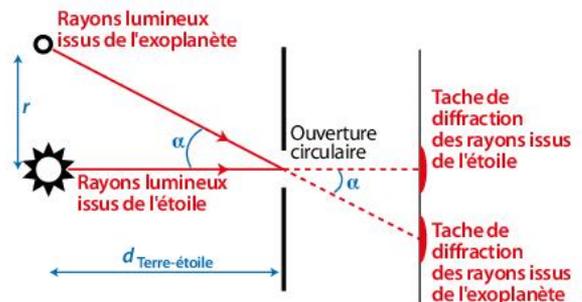
Dans le cas d'une ouverture circulaire, on admet que l'angle caractéristique de diffraction θ_{diff} (en radian) vérifie la relation :

$$\theta_{\text{diff}} = 1,22 \times \frac{\lambda}{d}$$

où λ est la longueur d'onde du faisceau incident et d le diamètre de l'ouverture.

B Écart angulaire et diffraction

Des rayons lumineux issus d'un couple étoile-planète et passant par l'ouverture circulaire d'un télescope terrestre sont représentés sur le schéma ci-dessous.



α est l'écart angulaire entre l'étoile et la planète, c'est-à-dire l'angle séparant l'étoile de la planète vues depuis la Terre.

Il est petit et se calcule par : $\alpha = \tan \alpha = \frac{r}{d_{\text{Terre-étoile}}}$ avec r la distance planète-étoile et $d_{\text{Terre-étoile}}$ la distance Terre-étoile.

C Critère de Rayleigh pour distinguer deux objets

Un télescope permet de distinguer deux objets à condition que l'écart angulaire α entre ces deux objets soit supérieur ou égal à l'angle de diffraction θ_{diff} .



$$\alpha > \theta_{\text{diff}}$$

On peut distinguer les deux objets.



$$\alpha = \theta_{\text{diff}}$$

On ne peut pas distinguer les deux objets.



$$\alpha < \theta_{\text{diff}}$$

1. À quelle condition l'étoile et la planète seront-elles vues séparément ?

2. Déterminer le diamètre D du télescope terrestre permettant de distinguer la planète 2M1207b de l'étoile 2M1207a sachant que la longueur d'onde des rayons lumineux provenant des deux objets célestes est $\lambda = 2,0 \mu\text{m}$.

Utiliser le réflexe 1

Coup de pouce QR Code p. 116

Données

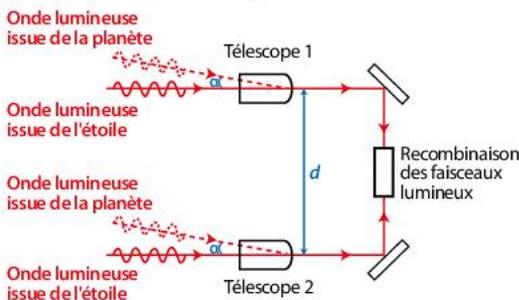
- Unité astronomique : $1 \text{ ua} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$.
- Année-lumière : $1 \text{ al} = 9,461 \times 10^{15} \text{ m}$.

Partie II Comment la faible luminosité d'une exoplanète rend-elle difficile son observation ?

En général, les planètes sont peu lumineuses par rapport aux étoiles, ce qui ajoute une difficulté supplémentaire pour les observer. Un dispositif interférométrique (schéma D) permet de contourner ce problème. L'objectif est d'éliminer le signal émis par l'étoile, tout en permettant l'enregistrement du signal émis par la planète.

D Dispositif interférométrique

On considère deux télescopes identiques dont les lignes de visée sont dirigées vers une étoile lointaine. La direction d'une exoplanète à proximité de l'étoile fait un angle α avec la ligne de visée.



Dans cet instrument, les faisceaux issus des deux télescopes sont recombinaison grâce à un dispositif optique situé à égale distance des deux télescopes.

1. Recombinaison des signaux issus de l'étoile

a. Justifier que, dans le dispositif décrit dans l'encadré D, les rayons lumineux issus de l'étoile et captés par les télescopes interfèrent de manière constructive au niveau de la recombinaison.

Utiliser le réflexe 2

b. On appelle T la période de l'onde lumineuse. On ajoute, juste après le télescope 2, un système optique qui permet d'ajouter un retard d'une demi-période $\frac{T}{2}$ sur le signal provenant de ce télescope. Montrer que ce système optique produit des interférences destructives entre les deux rayons issus de l'étoile au niveau de la recombinaison.

c. Quelle sera alors l'intensité du signal lié à l'étoile ?

2. Recombinaison des signaux issus de l'exoplanète

Les rayons lumineux issus de l'exoplanète arrivent sur les dispositifs interférométriques en faisant un angle α avec la ligne de visée. À cause de cette inclinaison, le signal lumineux arrive sur le télescope 2 avec un retard $\tau = \frac{d \times \sin \alpha}{c}$.

a. Montrer que le signal issu du télescope 2 a un retard $\tau' = \frac{d \times \sin \alpha}{c} + \frac{T}{2}$ par rapport au signal issu du premier télescope.

b. À quelle condition sur le retard τ' va-t-on obtenir des interférences constructives ?

Utiliser le réflexe 2

3. Montrer que cette relation peut aussi s'écrire :

$$d \times \sin \alpha = \left(k - \frac{1}{2}\right) \times \lambda \text{ avec } k \text{ un nombre entier.}$$

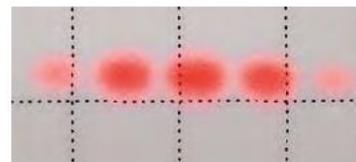
4. Pour des petits angles, $\sin \alpha = \tan \alpha = \frac{r}{d_{\text{Terre-étoile}}}$.

En déduire la distance minimale d entre les deux télescopes pour obtenir une interférence constructive lors de l'observation de l'exoplanète 2M1207b en rotation autour de l'étoile 2M107a, sachant que l'on travaille en infrarouge ($\lambda = 10 \mu\text{m}$).

27 CORRIGÉ 30 min Les fentes d'Young

Mobiliser et organiser ses connaissances.

Une figure comme celle ci-dessous est observée sur un écran quadrillé en éclairant un dispositif avec une lumière dont la longueur d'onde dans le vide est λ_0 .



1. À quelle(s) condition(s) peut-on observer une telle figure ?

2. On note D la distance entre le dispositif et l'écran et b la distance entre les deux fentes S_1 et S_2 de ce dispositif. L'interfrange i est donné par la relation :

$$i = \lambda_0 \times \frac{D}{b}.$$

Déterminer le nombre maximal de franges brillantes observables sur l'écran de largeur $\ell = 10 \text{ cm}$ si $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$, $b = 0,20 \text{ mm}$ et $D = 1,50 \text{ m}$.

Utiliser le réflexe 3

8

La lumière : un flux de photons



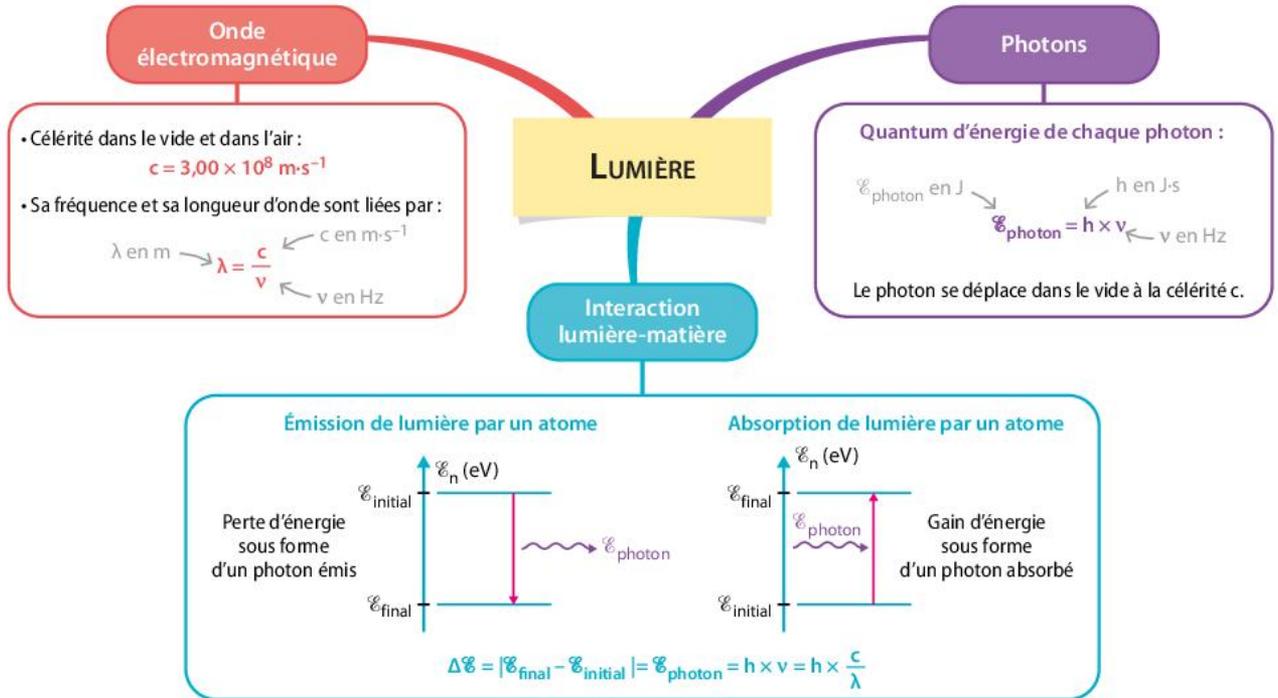
La production d'électricité par des panneaux photovoltaïques est en forte croissance, même dans des zones géographiques que l'on pourrait croire inadaptées.

- Comment déterminer le rendement d'un panneau photovoltaïque ?

➤ Rendez-vous : exercice 18 p. 141

Ce que je dois savoir et savoir faire

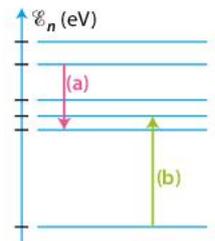
- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique. **Activité 1 p. 129**
- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière. **Activité 1 p. 129**
- Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence. **Activité 1 p. 129**
- Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique. **Activité 2 p. 130**
- Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière. **Exercice 11 p. 139**
- Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque. **Activité 2 p. 130**



Réactiver ses connaissances

▶ VIDÉO Interpréter et prévoir des spectres – QR Code p. 134

Le spectre de la lumière émise par l'hélium comporte notamment une raie de longueur d'onde dans le vide égale à 505 nm.



1. Calculer la fréquence de cette radiation.
2. Déterminer l'énergie transportée par chacun des photons de cette radiation.
3. Laquelle des transitions (a) ou (b) du schéma ci-contre est mise en jeu lors de l'émission de cette radiation ?
4. Décrire l'aspect du spectre d'absorption de l'hélium.

Donnée
Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Flash test 5 min

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s).

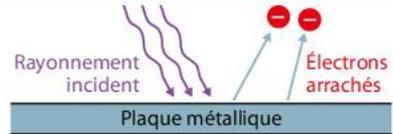
	A	B	C
1. La célérité de la lumière dans le vide vaut :	$3,0 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$3,0 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$3,0 \times 10^5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
2. L'énergie d'un photon peut s'exprimer en :	joule par seconde.	joule.	électronvolt.
3. La transition énergétique ci-contre correspond à : 	l'absorption d'un photon.	l'émission d'un photon.	l'émission ou l'absorption d'un photon.
4. Lors de l'absorption d'un photon, l'énergie d'un atome :	augmente toujours.	diminue toujours.	peut augmenter ou diminuer.

Découvert en 1887 par Einrich HERTZ, l'effet photoélectrique a de nombreuses applications : photodiodes, caméras...

► **Objectif de l'activité :** Comment expliquer l'effet photoélectrique ?

A Description de l'effet photoélectrique

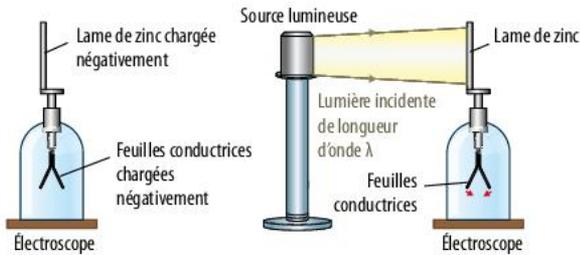
Lorsqu'un matériau métallique est éclairé par une onde électromagnétique de longueur d'onde suffisamment courte, des électrons sont arrachés à sa surface de façon quasi instantanée.



B Une brève histoire de l'effet photoélectrique

1888 – Wilhelm HALLWACHS présente l'expérience suivante.

- On charge négativement l'électroscope et une lame de zinc en contact avec lui.
- La lame de zinc est éclairée, ce qui provoque la décharge progressive de l'électroscope.



1899-1902 – Philipp LENARD fait une série d'observations :

- les radiations UV arrachent des électrons aux métaux de manière quasi instantanée. Ce n'est pas toujours le cas des radiations visibles ;
- lorsque les électrons sont arrachés :
 - leur nombre est proportionnel à l'éclairement,
 - leur énergie cinétique est indépendante de l'éclairement,
 - leur énergie cinétique augmente quand la longueur d'onde de la radiation incidente diminue.



Le modèle ondulatoire de la lumière, admis à l'époque, ne permet pas d'expliquer ces phénomènes.



1905 – Albert EINSTEIN publie un article expliquant que la lumière pourrait être un ensemble de particules (plus tard nommées photons). Chaque particule possède une énergie inversement proportionnelle à la longueur d'onde λ du rayonnement lumineux :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ en J} \quad \mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \frac{c}{\lambda} \quad \begin{matrix} c \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1} \\ \lambda \text{ en m} \end{matrix}$$

$h \text{ en J} \cdot \text{s}$

• L'effet photoélectrique ne se manifeste que si l'énergie du photon est supérieure au travail d'extraction d'un électron du métal noté $W_{\text{extraction}}$. L'énergie excédentaire est emportée par l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Analyse des documents

Interpréter des observations VAL

- Observer le schéma de l'expérience de Wilhelm HALLWACHS, puis interpréter cette expérience.

Extraire et organiser l'information ANA-RAIS

- Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie du photon incident, celle transférée pour arracher un électron du métal et celle emportée par l'électron arraché.

Discuter un modèle VAL

- Comment la proposition d'Albert EINSTEIN permet-elle d'expliquer l'observation de Philipp LENARD,

selon laquelle les radiations UV sont davantage capables d'arracher des électrons aux métaux que les rayonnements visibles ?

Effectuer des calculs REA

- Pour le zinc, le travail d'extraction d'un électron est 3,63 eV. Calculer la valeur de la vitesse d'un électron arraché d'une lame de zinc soumise à un rayonnement UV de longueur d'onde 300 nm.

Un pas vers le cours

Rendre compte à l'écrit en utilisant un vocabulaire adapté COM

- Comment expliquer l'effet photoélectrique ?

Activité expérimentale 2

Rendement d'une cellule photovoltaïque

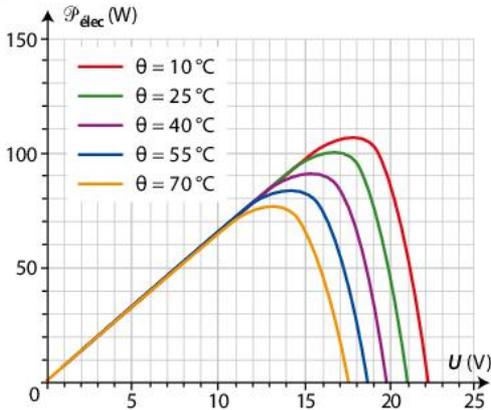
Notion
Rendement

Le 18 octobre 2019, la France inaugure sa première centrale photovoltaïque flottante. Installée sur le lac artificiel de Piolenc dans le Vaucluse, elle possède une puissance maximale de 10 MW et un meilleur rendement que si elle était située sur la terre ferme.



► **Objectif de l'activité :** Comment déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque ?

A Puissance électrique d'un panneau photovoltaïque et température



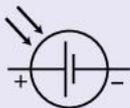
À éclairement constant, la puissance électrique \mathcal{P}_{elec} fournie par un panneau de cellules photovoltaïques dépend de la température.

MATÉRIEL DISPONIBLE



COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE

• La cellule photovoltaïque a pour symbole :



• La puissance lumineuse reçue est le produit de l'éclairement E_{eclair} , exprimé en $W \cdot m^{-2}$, par la surface S utile du convertisseur, exprimée en m^2 .

$$\mathcal{P}_{lum} \text{ en W} \rightarrow \mathcal{P}_{lum} = E_{eclair} \times S \quad \begin{matrix} \leftarrow S \text{ en } m^2 \\ \leftarrow E_{eclair} \text{ en } W \cdot m^{-2} \end{matrix}$$

• Le rendement de conversion d'un convertisseur, noté η , est une grandeur sans dimension qui mesure l'efficacité de sa conversion.

Il est défini par :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{exploitable}}{\mathcal{P}_{entree}} \quad \begin{matrix} \leftarrow \mathcal{P} \text{ en W} \\ \leftarrow \end{matrix}$$

Le rendement est toujours inférieur ou égal à 1. Il peut être exprimé en pourcentage.

Plus le rendement se rapproche de 1, plus le convertisseur est efficace.

Pratique expérimentale

Élaborer et mettre en œuvre un protocole ANA-RAIS · RÉA

1 Proposer et mettre en œuvre un protocole expérimental permettant de représenter la caractéristique tension-intensité $I = f(U)$ d'une cellule photovoltaïque et de déterminer l'éclairement de la cellule.

Tracer un graphique RÉA

2 Représenter la courbe $\mathcal{P}_{elec} = f(U)$ et déterminer la puissance électrique maximale fournie par la cellule photovoltaïque.

Effectuer des calculs RÉA

3 Exprimer, puis calculer, le rendement maximal de conversion de la cellule photovoltaïque dans les conditions de l'expérience.

Extraire et organiser l'information APP

4 Indiquer l'intérêt de placer des cellules photovoltaïques sur un lac.

Un pas vers le cours

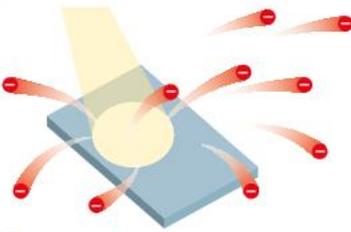
Rédiger une explication COM

5 Comment déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque ?

A Heinrich HERTZ



B Effet photoélectrique

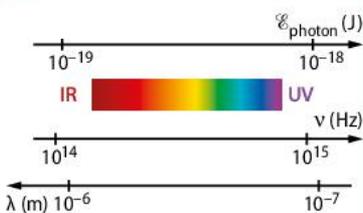


➤ Des électrons sont arrachés du métal sous l'effet d'une radiation lumineuse.

RAPPELS

- La lumière peut être décrite comme un flux de photons. Chaque photon possède une masse nulle et se propage à la célérité c de la lumière. Dans le vide, $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette valeur est souvent arrondie à $3,00 \times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$.

C Spectre électromagnétique



➤ Un photon IR transporte moins d'énergie qu'un photon UV.

1 L'effet photoélectrique

a. Description de l'effet photoélectrique

• En 1887, Heinrich HERTZ (photographie A) réalise des expériences sur les ondes électromagnétiques de grande longueur d'onde, appelées depuis ondes hertziennes. Il remarque qu'un rayonnement ultraviolet favorise des décharges électriques, sous forme d'étincelles, au niveau des électrodes métalliques de son détecteur d'ondes hertziennes. S'il identifie la cause du phénomène observé, il ne sait pas l'interpréter.

• Par la suite, d'autres scientifiques étudient ces phénomènes :

– En 1888, Wilhem HALLWACHS constate qu'une plaque de zinc éclairée par de la lumière ultraviolette se charge positivement.

– Entre 1889 et 1895, Julius ELSTER et Hans GEITEL établissent un classement des métaux vis-à-vis de ce phénomène. Ils montrent notamment que pour les métaux alcalins, la lumière visible et ultraviolette permet d'observer cet effet. Pour les autres métaux, l'effet n'est visible qu'avec de la lumière ultraviolette.

– En 1900, Philipp LENARD montre que des particules négatives sont arrachées d'une plaque métallique sous l'effet de la lumière. Ces particules négatives sont en fait des électrons (schéma B), découverts en 1897 par Joseph John THOMSON.

Le modèle ondulatoire de la lumière, qui était le modèle admis à l'époque, ne permet pas d'expliquer ces différentes observations.

• En 1905, Albert EINSTEIN postule que la lumière est constituée d'un ensemble de quanta d'énergie. Sa théorie lui permet, entre autres, d'expliquer les observations de P. LENARD. En 1916, son interprétation est validée par les expériences de Robert Andrew MILLIKAN. En 1926, Gilbert Newton LEWIS nomme « photons » les particules de lumière porteuses de ces quanta d'énergie.

L'effet photoélectrique est le phénomène d'éjection d'électrons d'un métal sous l'effet de radiations lumineuses. Pour un métal donné, cet effet ne se manifeste que pour des photons d'énergie suffisamment grande. L'effet est alors quasi instantané.

b. Énergie du photon

• L'énergie d'un photon est proportionnelle à la fréquence ν de l'onde lumineuse associée, et donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde λ (schéma C).

L'énergie d'un photon, notée $\mathcal{E}_{\text{photon}}$, est égale au produit de la constante de Planck h par la fréquence ν de la radiation associée à ce photon :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

Annotations : $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ en J, h en $\text{J}\cdot\text{s}$, ν en Hz ou s^{-1} , c en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, λ en m.

• Pour un métal donné, l'effet photoélectrique se produit lorsque la longueur d'onde de la radiation lumineuse mise en jeu est inférieure à une longueur d'onde seuil λ_s . La fréquence ν de cette radiation est alors supérieure à la fréquence seuil ν_s . L'énergie de chaque photon associé à cette radiation lumineuse est alors suffisante pour arracher un électron du métal : l'effet photoélectrique est observé.



Bilan énergétique de l'effet photoélectrique

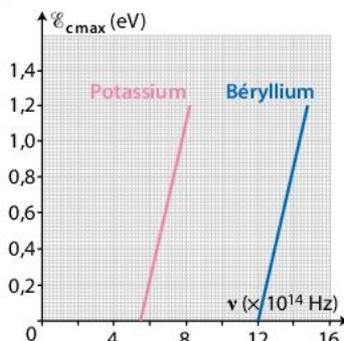
VIDÉO DE COURS

D Albert EINSTEIN



En 1905, Albert EINSTEIN reprend le modèle particulaire de la lumière proposé par Isaac NEWTON au XVII^e siècle et abandonné au XIX^e siècle au profit du modèle ondulatoire.

E Énergie cinétique maximale des électrons



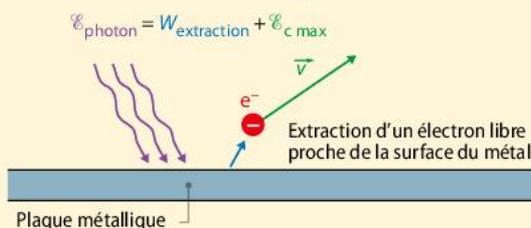
Lors de l'effet photoélectrique, l'énergie cinétique maximale $E_{c\max}$ des électrons arrachés augmente avec la fréquence ν des photons incidents. Le coefficient directeur de chaque droite permet de retrouver la constante de Planck h .

c. Bilan énergétique et interprétation à l'aide du modèle particulaire

- Un **métal solide** est un édifice cristallin. Les atomes qui le constituent sont proches les uns des autres. Leurs électrons, en particulier les électrons périphériques, sont soumis à des interactions de la part de tous les noyaux environnants. Pour certains de ces électrons, les interactions avec les autres noyaux sont si fortes qu'ils sont libérés de leur atome initial : ce sont les **électrons libres** ou électrons de conduction.
- L'**énergie minimale** permettant d'arracher un électron d'un métal est égale au travail à fournir pour extraire un électron libre proche de la surface du métal. Elle est appelée **travail d'extraction**, $W_{\text{extraction}}$. Elle diffère d'un métal à un autre. Si l'énergie du photon est supérieure au travail d'extraction, l'excédent d'énergie est emporté par cet électron sous la forme d'**énergie cinétique**.
- L'arrachage d'autres électrons nécessite une plus grande énergie. Pour une même radiation lumineuse, l'énergie cinétique de l'électron arraché est alors plus faible. L'énergie cinétique d'un électron arraché est donc maximale pour un électron libre proche de la surface du métal.

Lors de l'**effet photoélectrique**, l'énergie $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ du photon incident est transférée à un électron pour l'extraire du réseau cristallin métallique ; le surplus d'énergie est emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Si l'électron arraché est un électron libre proche de la surface du métal, la relation de **conservation de l'énergie** s'écrit :



$$\text{soit } h \times \nu_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \frac{1}{2} m_e \times v_{\text{max}}^2$$

h en $J \cdot s$ ν_{photon} en Hz ou s^{-1} $W_{\text{extraction}}$ en J m_e en kg v_{max} en $m \cdot s^{-1}$

Cette équation de conservation de l'énergie lors de l'effet photoélectrique est connue sous le nom d'« équation d'Einstein de l'effet photoélectrique » (photographie D). Elle explique chaque aspect de l'effet photoélectrique, notamment l'augmentation de l'énergie cinétique maximale des électrons arrachés en fonction de la fréquence du photon incident (courbe E).

- Si la lumière apportait progressivement l'énergie nécessaire pour arracher les électrons du métal comme le prévoit la théorie ondulatoire de la lumière, il suffirait d'éclairer le métal pendant une durée suffisante pour y parvenir. Or il n'en est rien : soit le phénomène a lieu quasi instantanément, soit il n'a pas lieu, car l'énergie apportée par le photon est insuffisante.

Le **modèle particulaire** de la lumière la décrit comme un flux de photons. Il permet d'expliquer l'effet photoélectrique, contrairement au modèle ondulatoire.

2 L'absorption ou l'émission de photons

a. Absorption de photons et cellule photoélectrique

Une **cellule photoélectrique**, ou photorécepteur, désigne tout dispositif dont une des propriétés électriques est modifiée lors de l'absorption de photons.

- La plupart des cellules photoélectriques font appel à des matériaux semi-conducteurs, dont les propriétés électriques sont intermédiaires entre celles d'un isolant et celles d'un conducteur métallique.
- L'absorption de photons engendre un signal électrique qui peut commander divers dispositifs comme l'allumage d'un éclairage.
- Parmi les cellules photoélectriques, on peut citer les **cellules photovoltaïques** (photographie **F**). Sous l'effet de la lumière, une tension électrique apparaît entre leurs faces : ce sont des générateurs. Elles convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le **rendement** η d'une cellule photovoltaïque est le rapport, sans unité, de la puissance ou l'énergie exploitable sur la puissance ou l'énergie en entrée :

$$\text{sans unité} \rightarrow \eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{elec}}}{\mathcal{E}_{\text{lum}}}$$

\mathcal{P} en W \mathcal{E} en J
 \mathcal{P} en W \mathcal{E} en J

- Certains composants électriques sont aussi des cellules photoélectriques.

Exemples : Une **photorésistance** est un dipôle dont la résistance diminue d'autant plus que la lumière qu'elle reçoit est intense. Elle est donc sensible à toute variation de l'éclairement reçu (graphique **G**).

Une **photodiode** est un dipôle qui est traversé par un courant électrique d'intensité d'autant plus grande que la lumière qu'il reçoit est intense. Les photodiodes sont utilisées dans les capteurs CCD ou CMOS contenus dans les appareils photographiques ou les caméras (photographie **H**).

L'analyse des charges électriques accumulées dans les diverses zones du capteur permet de reconstruire l'image de l'objet photographié.

- La **spectroscopie** est une méthode d'analyse qui utilise des capteurs CCD ou CMOS. Le composé à analyser est éclairé par des radiations qui interagissent avec la matière. Les longueurs d'onde des radiations que le composé absorbe donnent des renseignements sur sa structure chimique.

b. Émission de photons et diodes électroluminescentes (DEL)

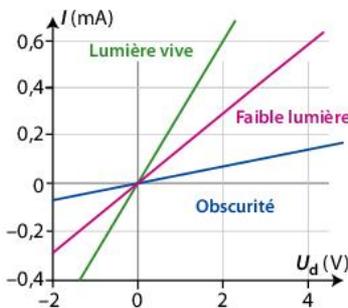
- Une diode électroluminescente (DEL) est un dipôle dans lequel s'opère une conversion inverse de celle qui a lieu dans une photodiode. Le passage d'un courant électrique dans la structure semi-conductrice d'une DEL entraîne l'émission de photons. La fréquence de la lumière émise, et de ce fait la couleur de cette lumière, dépend de la nature du semi-conducteur.
- Une diode laser a la particularité d'émettre une radiation que l'on peut rendre plus directive que celle d'une DEL : l'énergie est alors concentrée dans une direction.

F Panneaux solaires



> Les panneaux solaires sont constitués de cellules photovoltaïques.

G Caractéristique intensité-tension d'une photorésistance



H Capteur CMOS



> Un capteur CMOS, constitué de photodiodes, convertit un signal lumineux en signal électrique.



▶ VIDÉO DE COURS
 Bilan énergétique de l'effet photoélectrique
▶ QCM
 Version interactive

1 L'effet photoélectrique

décrit la lumière comme un flux de photons

Modèle particulaire de la lumière

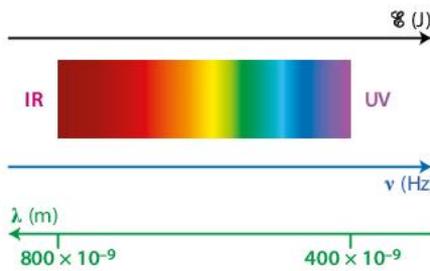
explique l'effet photoélectrique

Le photon

- Particule de **masse nulle** qui se propage à la **célérité de la lumière** : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Énergie d'un photon associé à une **radiation de fréquence ν** :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

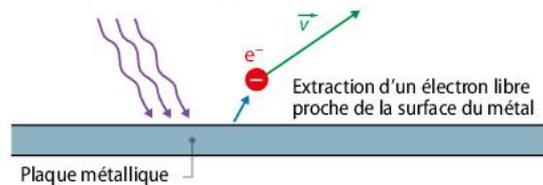
\mathcal{E} en J, h en J·s, c en m·s⁻¹, ν en Hz ou s⁻¹, λ en m



L'effet photoélectrique

- **Éjection d'électrons d'un métal sous l'effet d'une radiation de fréquence suffisamment élevée** donc pour des photons d'énergie suffisamment grande.
- **Bilan énergétique de l'effet photoélectrique pour un électron libre proche de la surface du métal** :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$$



$$h \times \nu_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \frac{1}{2} m_e \times v_{\text{max}}^2$$

$W_{\text{extraction}}$ en J, h en J·s, ν_{photon} en Hz ou s⁻¹, m_e en kg, v_{max} en m·s⁻¹

$W_{\text{extraction}}$ est l'énergie nécessaire pour extraire un électron libre proche de la surface du métal.

2 L'absorption ou l'émission de photons

Une **cellule photoélectrique** désigne tout dispositif dont une des propriétés électriques est modifiée à l'absorption de photons.

	Photorésistance, photodiode, capteur d'appareil photographique	Cellule photovoltaïque	Spectroscopie
Absorption de photons	 Absorption de photons pour détecter la lumière	 Absorption de photons pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique Rendement : $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{elec}}}{\mathcal{E}_{\text{lum}}}$	 Absorption de photons pour réaliser des analyses chimiques

Dans tous ces dispositifs, il y a une **interaction photon-matière**.

DEL (diode électroluminescente)	
Emission de photons	Émission de photons lorsque la DEL est parcourue par un courant électrique, sans toutefois qu'elle soit portée à haute température. 

Donnée

Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Pour chaque question, indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s), puis vérifier la correction p. 147.

A

B

C

1 L'effet photoélectrique

Si erreur, revoir § 1 p. 131

1. La lumière rouge d'un laser hélium-néon a pour longueur d'onde 632,8 nm. Sa fréquence est :	$4,74 \times 10^{-4} \text{ Hz}$	190 Hz	$4,74 \times 10^{14} \text{ Hz}$
2. Un photon associé à une radiation lumineuse rouge est :	aussi énergétique qu'un photon associé à une radiation bleue.	plus énergétique qu'un photon associé à une radiation bleue.	moins énergétique qu'un photon associé à une radiation bleue.
3. Une télécommande d'ouverture de portail émet une radiation de longueur d'onde $\lambda = 11,1 \text{ m}$.	$1,79 \times 10^{-26} \text{ J}$	$1,79 \times 10^{-35} \text{ J}$	$2,21 \times 10^{-24} \text{ J}$
 L'énergie d'un photon associé à cette radiation est :			
4. L'effet photoélectrique est le phénomène :	d'absorption d'électrons d'un métal sous l'effet de la lumière.	d'éjection d'électrons d'un métal sous l'effet de la lumière.	d'émission de photons d'un métal sous l'effet de la température.
5. Dans l'effet photoélectrique, l'émission d'un électron nécessite :	que la longueur d'onde de la lumière incidente dépasse une valeur seuil.	que la fréquence de la lumière incidente dépasse une valeur seuil.	n'importe quelle radiation lumineuse incidente pourvu qu'elle soit suffisamment intense.
6. En éclairant du cuivre avec des photons d'énergie $\mathcal{E}_{\text{photon}} = 1,00 \times 10^{-18} \text{ J}$, on observe l'éjection d'électrons d'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 2,48 \times 10^{-19} \text{ J}$. Le travail d'extraction du cuivre $W_{\text{extraction}}$ est :	$7,52 \times 10^{-19} \text{ J}$	$1,00 \times 10^{-18} \text{ J}$	$1,25 \times 10^{-18} \text{ J}$

2 L'absorption ou l'émission de photons

Si erreur, revoir § 2 p. 133

7. Une cellule photoélectrique est un dispositif dont les propriétés électriques varient en fonction :	de la température.	de la lumière qui l'éclaire.	de la lumière qu'elle émet.
8. Une cellule photovoltaïque reçoit une puissance lumineuse \mathcal{P}_{lum} et fournit une puissance électrique $\mathcal{P}_{\text{élec}}$. Son rendement η est :	$\eta = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \mathcal{P}_{\text{lum}}$	$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{lum}}}{\mathcal{P}_{\text{élec}}}$	$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$

Si l'énoncé demande de...

Calculer l'énergie du photon incident, le travail d'extraction d'un électron ou l'énergie cinétique maximale de l'électron éjecté.

Il est nécessaire de...

Réflexe 1

- Identifier ce que devient l'énergie du photon incident.
- Écrire le bilan d'énergie qui lie l'énergie du photon incident, le travail d'extraction d'un électron et l'énergie cinétique maximale de l'électron éjecté.
- Isoler éventuellement la grandeur recherchée et effectuer le calcul en faisant attention aux unités.

➔ Ex. 7 p. 138

Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.

Réflexe 2

- Repérer la puissance ou l'énergie exploitable, ainsi que la puissance ou l'énergie d'entrée.
- Écrire l'expression du rendement $\eta = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{lum}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{elec}}}{\mathcal{E}_{\text{lum}}}$.
- Calculer le rendement en faisant attention aux unités.

➔ Ex. 9 p. 139

1 Exercice résolu

Une plaque de césium

| Exploiter des informations ; effectuer des calculs.

Du césium (photographie ci-contre) est éclairé par une lumière monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 0,44 \mu\text{m}$. La longueur d'onde seuil du césium pour l'effet photoélectrique est $\lambda_s = 0,64 \mu\text{m}$.

1. Calculer le travail d'extraction $W_{\text{extraction}}$ pour le césium.
2. Sans calcul, prévoir si un photon incident associé à la lumière monochromatique décrite ci-dessus possède suffisamment d'énergie pour arracher un électron de ce métal.
3. Calculer l'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{c \text{ max}}$ de chaque électron éjecté.
4. Calculer la valeur maximale v_{max} de la vitesse de chaque électron éjecté.



Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- Masse d'un électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Solution rédigée

1. Le travail d'extraction est égal à l'énergie minimale d'un photon, associé à une radiation lumineuse de longueur d'onde λ_s , nécessaire à l'extraction d'un électron.

$$W_{\text{extraction}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{h \times c}{\lambda_s}$$

$$W_{\text{extraction}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0,64 \times 10^{-6} \text{ m}} = 3,1 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Le travail d'extraction d'un électron pour le césium est $3,1 \times 10^{-19} \text{ J}$.

2. Un photon arrache un électron si son énergie est supérieure à $W_{\text{extraction}}$.

L'énergie d'un photon a pour expression $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu$, d'où $\mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{h \times c}{\lambda}$.

Elle est inversement proportionnelle à la longueur d'onde λ . Comme $\lambda < \lambda_s$, l'énergie d'un photon associé à cette radiation est supérieure au travail d'extraction : l'électron pourra être arraché.

3. L'énergie du photon sert pour une partie à arracher un électron, le reste se retrouve sous forme d'énergie cinétique de l'électron.

Le bilan énergétique lors de l'effet photoélectrique s'écrit donc :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}} \text{ D'où } \mathcal{E}_{c \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}} = \frac{h \times c}{\lambda} - W_{\text{extraction}}$$

$$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0,44 \times 10^{-6} \text{ m}} - 3,1 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

L'énergie cinétique maximale de l'électron éjecté est $1,4 \times 10^{-19} \text{ J}$.

$$4. \text{ On a : } \mathcal{E}_{c \text{ max}} = \frac{1}{2} m_e \times v_{\text{max}}^2$$

$$\text{d'où } v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \mathcal{E}_{c \text{ max}}}{m_e}} \text{ . Soit } v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,4 \times 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 5,6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La valeur maximale de la vitesse d'un électron éjecté est $5,6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

• On utilise le Réflexe 1.

Identification des formes d'énergie mises en jeu

Écriture du bilan énergétique

Isolement de la grandeur recherchée et calcul en faisant attention aux unités

2 Exercice résolu

Un projet photovoltaïque

Exploiter des informations ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique.

L'installation de panneaux photovoltaïques chez un particulier nécessite, au préalable, une étude de rentabilité. Les panneaux photovoltaïques au silicium polycristallin sont les plus utilisés sur le marché. Les fabricants annoncent un rendement compris entre 10 % et 18 %.

Le site de la Commission européenne permet une simulation avant l'installation de panneaux photovoltaïques.



A Simulation relative à l'installation de panneaux photovoltaïques chez un particulier

Technologie photovoltaïque	Silicium polycristallin
Latitude/Longitude	45° Nord/0,8° Est
Inclinaison optimale	37°
Orientation optimale	4° vers l'Ouest
Énergie lumineuse annuelle par unité de surface de panneaux	1 590 kW · h · m ⁻²
Production annuelle d'énergie électrique pour 6,50 m ² de panneaux photovoltaïques	1 270 kW · h

L'inclinaison est mesurée par rapport à l'horizontale. L'orientation est mesurée par rapport au Sud.

B Facteurs de correction pour une inclinaison et une orientation données en France métropolitaine

Orientation \ Inclinaison	Inclinaison			
	0°	30°	60°	90°
Est	0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est	0,93	0,96	0,88	0,66
Sud	0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest	0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest	0,93	0,90	0,78	0,55

Le rendement est d'autant meilleur que le facteur de correction est élevé.

- Quelle conversion d'énergie les panneaux photovoltaïques réalisent-ils ?
- Quelle est l'énergie lumineuse reçue, d'après la simulation, par les panneaux photovoltaïques au cours de l'année ?
- Exprimer puis calculer le rendement de ces panneaux. Conclure.
- Les indications d'inclinaison et d'orientation maximales proposées sont-elles bien choisies ?

Solution rédigée

- On utilise le Réflexe 2.

Repérage des énergies d'entrée et exploitable

Écriture de l'expression du rendement

Calcul du rendement en exprimant les deux énergies dans la même unité

1. Les panneaux photovoltaïques convertissent de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

2. L'énergie lumineuse annuelle par mètre carré est $\mathcal{E}_{\text{lum}} = 1\,590 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ pour une surface des panneaux de $S = 6,50 \text{ m}^2$. Ces panneaux reçoivent donc, en une année, une énergie lumineuse égale à : $\mathcal{E}_{\text{totale, reçue}} = \mathcal{E}_{\text{lum}} \times S$.

Soit $\mathcal{E}_{\text{totale, reçue}} = 1\,590 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \times 6,50 \text{ m}^2 = 1,03 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

3. L'énergie totale reçue par ces panneaux est $\mathcal{E}_{\text{totale, reçue}} = 1,03 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

L'énergie électrique produite est $\mathcal{E}_{\text{elec}} = 1\,270 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

Le rendement s'exprime par $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{elec}}}{\mathcal{E}_{\text{totale, reçue}}}$.

Ainsi, $\eta = \frac{1\,270 \text{ kW} \cdot \text{h}}{1,03 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}} = 0,123$ ou 12,3 %.

Le rendement de ces panneaux au cours d'une année est 12,3 %.

Cette valeur est bien dans l'intervalle 10 %-18 % annoncé en introduction.

4. Le facteur de correction le plus élevé correspond aux conditions d'orientation et d'inclinaison optimales. D'après le tableau B, en France métropolitaine, il est obtenu pour une inclinaison de 30° et une orientation plein sud.

La simulation indique une inclinaison de 37° et une orientation de 4°, soit pratiquement vers le sud. Les valeurs des deux tableaux sont donc cohérentes.

Le tableau A tient compte de la position exacte à la surface du globe terrestre (latitude, longitude) des panneaux photovoltaïques. Ses valeurs sont donc a priori plus pertinentes que celles du tableau B.

Parcours d'exercices CORRIGÉS

Ce que je dois savoir et savoir faire

- Décrire l'effet photoélectrique. L'interpréter à partir du modèle particulaire de la lumière.
- Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence.
- Calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque.

Appliquer le cours

3 5

S'entraîner

13

Vers le BAC

21

21

9

14

22 23

1 L'effet photoélectrique

▶ **VIDÉO DE COURS** Bilan énergétique de l'effet photoélectrique
QR Code p. 134

3 Connaître l'effet photoélectrique

CORRIGÉ | Restituer ses connaissances.

- Définir l'effet photoélectrique. Illustrer la réponse à l'aide d'un schéma légendé.

4 Décrire l'effet photoélectrique

| Effectuer des calculs.

Le tableau ci-dessous recense les fréquences minimales des radiations à partir desquelles on observe l'effet photoélectrique pour quelques métaux.

Métal	Fréquence (Hz)
Plomb Pb	$1,02 \times 10^{15}$
Potassium K	$5,52 \times 10^{14}$
Magnésium Mg	$8,82 \times 10^{14}$

1. Calculer les longueurs d'onde correspondant à ces fréquences.
2. Quel type de radiation (UV, visible, IR) permet d'observer l'effet photoélectrique quel que soit le métal de la liste ci-dessus ?

5 Interpréter l'effet photoélectrique

CORRIGÉ | Interpréter des observations.

En 1888, Wilhelm HALLWACHS observe qu'une radiation de longueur d'onde $\lambda_1 = 330$ nm est capable de charger positivement une plaque de zinc, ce que ne permet pas une radiation de longueur d'onde $\lambda_2 = 400$ nm.

1. Expliquer pourquoi la plaque de zinc se charge positivement.
2. Calculer l'énergie des photons associés à chacune des radiations évoquées.
3. Proposer une explication à la constatation de W. HALLWACHS selon laquelle la radiation de longueur d'onde $\lambda_2 = 400$ nm ne permet pas à la plaque de zinc de se charger positivement.

Donnée

Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s.

6 Expliquer l'effet photoélectrique

| Restituer ses connaissances.

En 1905, Albert EINSTEIN postule que la lumière se comporte comme un ensemble de particules, ce qu'il appelle l'« hypothèse des quanta de lumière » (*Lichtquanten*).



1. Quel nom donne-t-on aujourd'hui aux quanta de lumière évoqués par Albert EINSTEIN EN 1905 ?
2. En quoi ces quanta permettent-ils d'expliquer l'effet photoélectrique, contrairement au modèle ondulatoire de la lumière ?

7 Réaliser un bilan d'énergie

CORRIGÉ | Effectuer des calculs.

Un photon d'énergie $\mathcal{E}_{\text{photon}} = 5,03$ eV extrait, par effet photoélectrique, des électrons à un morceau de fer métallique.

1. Écrire la relation entre l'énergie du photon incident $\mathcal{E}_{\text{photon}}$, le travail d'extraction $W_{\text{extraction}}$ et l'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{c,\text{max}}$ d'un électron extrait.
2. Calculer, en joule, l'énergie cinétique maximale de l'électron arraché.

Utiliser le réflexe 1

Données

- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J.
- Pour le fer : $W_{\text{extraction}} = 4,67$ eV.

8 Calculer l'énergie d'un photon

| Utiliser un modèle pour prévoir.

Sous l'effet d'une radiation, des électrons sont extraits d'un morceau de titane avec une vitesse maximale de valeur $v_{\text{max}} = 7,60 \times 10^5$ m·s⁻¹.



1. Donner la relation entre l'énergie du photon incident $\mathcal{E}_{\text{photon}}$, le travail d'extraction $W_{\text{extraction}}$ et l'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{c,\text{max}}$ d'un électron extrait.
2. Calculer l'énergie du photon associé à la radiation.
3. En déduire la longueur d'onde de la radiation.

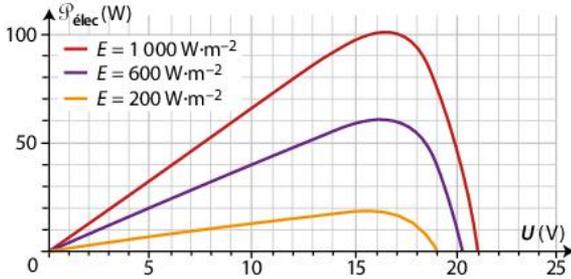
Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s.
- Masse d'un électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg.
- Pour le titane : $W_{\text{extraction}} = 6,93 \times 10^{-19}$ J.

9 Calculer des rendements

COBRIGÉ | Extraire et organiser l'information.

Le graphique ci-dessous représente la puissance électrique disponible d'un panneau de cellules photovoltaïques de $1,1 \text{ m}^2$ pour différents éclairements E .



1. Comment la puissance électrique disponible évolue-t-elle lorsque l'éclairément E diminue ?
2. Rappeler l'expression du rendement η pour un panneau de cellules photovoltaïques.
3. Calculer le rendement maximal pour les différents éclairéments, puis conclure. Utiliser le réflexe 2

10 Exploiter un rendement

| Effectuer des calculs.

Le record mondial de performance pour une cellule photovoltaïque en silicium polycristallin a été battu en mars 2018 avec un rendement de 22,3%.



1. Quel est l'intérêt d'améliorer le rendement des cellules photovoltaïques ?

2. Pour la cellule citée, calculer la puissance électrique disponible $\mathcal{P}_{\text{elec}}$ dans le cas d'une puissance lumineuse reçue $\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,13 \times 10^1 \text{ W}$.

2 L'absorption ou l'émission de photons

11 Citer des applications de l'interaction photon-matière

COBRIGÉ | Restituer ses connaissances.

• Citer quelques applications mettant en jeu l'interaction photon-matière. Pour chacune d'elles, dire si l'interaction met en jeu l'absorption ou l'émission d'un photon.

12 Reconnaître l'absorption ou l'émission de photons

| Mobiliser et organiser ses compétences.

• Pour chacun des systèmes suivants, indiquer s'il met en jeu l'absorption ou l'émission de photons.

a Une cellule photo-électrique



b Un chargeur photovoltaïque de téléphone



c Une DEL infrarouge de télécommande



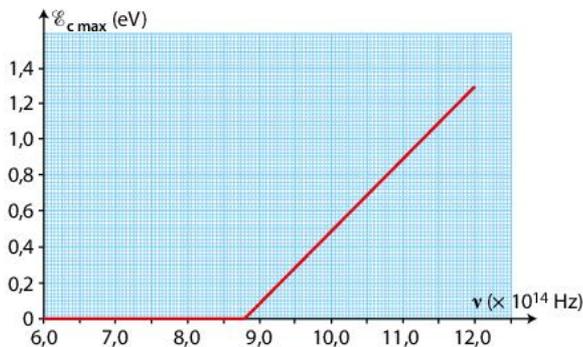
Exercices S'entraîner

13 Connaître les critères de réussite

Conservation de l'énergie

| Extraire et organiser l'information.

Le graphique ci-dessous représente l'énergie cinétique maximale des électrons émis d'une plaque de zinc par effet photoélectrique, en fonction de la fréquence ν de la radiation incidente.



1. a. Calculer la longueur d'onde seuil λ_s permettant d'obtenir l'effet photoélectrique avec le zinc.

b. λ_s correspond-elle à une longueur d'onde minimale ou maximale d'obtention de l'effet photoélectrique ?

2. Pour une radiation de fréquence $\nu = 1,1 \times 10^{15} \text{ Hz}$, calculer, à l'aide d'un bilan d'énergie, l'énergie cinétique maximale des électrons émis.

3. Vérifier graphiquement le calcul précédent.

Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Critères de réussite



Rigueur dans l'utilisation des données

J'ai repéré sur le graphique les unités utilisées (question 1).

J'ai réalisé le calcul en respectant les unités (question 2).

Justification de la réponse

J'ai expliqué comment j'ai utilisé le graphique (question 3).

14 À chacun son rythme

Une histoire de rendement

| Extraire et organiser l'information ; effectuer des calculs.

Commencer par résoudre l'énoncé compact. En cas de difficultés, passer à l'énoncé détaillé.

Un fabricant de panneaux photovoltaïques fournit les indications suivantes :

Caractéristiques

Puissance électrique* :

$$P = 305 \text{ W}$$

Nombre de cellules :

60

Dimensions d'une cellule :

160 mm × 160 mm

* Puissance maximale pour un éclairement $E = 1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.



Énoncé compact

Calculer le rendement maximal de ce panneau photovoltaïque.

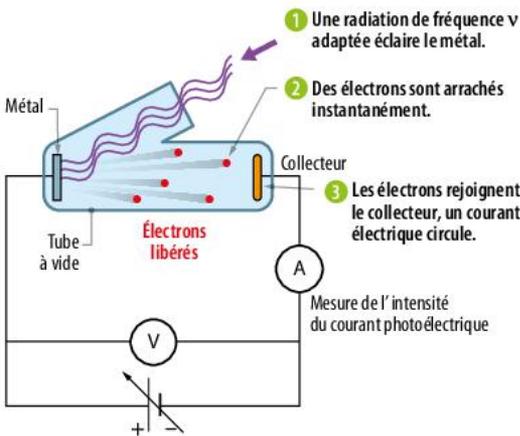
Énoncé détaillé

1. Réaliser un bilan de puissance pour le panneau photovoltaïque.
2. Rappeler l'expression du rendement en fonction des puissances mises en jeu.
3. Calculer le rendement maximal de ce panneau photovoltaïque.

15 Énergie cinétique des électrons

| Extraire et organiser l'information ; effectuer des calculs.

Afin de déterminer l'énergie cinétique des électrons arrachés d'un métal par effet photoélectrique, le physicien Philip LENARD utilisait un dispositif expérimental dont le principe est schématisé ci-dessous :



Une tension électrique est appliquée entre le métal et le collecteur. Il apparaît alors un champ électrique qui empêche les électrons de rejoindre le collecteur. La tension nécessaire pour que l'intensité du courant électrique soit nulle est appelée tension d'arrêt. Elle est notée U_a . L'énergie cinétique maximale des électrons émis par effet photoélectrique se calcule alors à l'aide de la relation :

$$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = e \times U_a$$

avec $\mathcal{E}_{c \text{ max}}$ en joule, e en coulomb et U_a en volt.

Une plaque métallique en cuivre est illuminée par une radiation de longueur d'onde λ . Dans le cas particulier d'une radiation ultraviolette telle que $\lambda = 171 \text{ nm}$, on trouve une tension d'arrêt $U_a = 2,80 \text{ V}$.

1. a. Calculer l'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{c \text{ max}}$ acquise par les électrons.
b. En déduire la valeur de la vitesse maximale v_{max} des électrons émis par effet photoélectrique.
2. Rappeler la relation traduisant la conservation d'énergie dans le cas de l'effet photoélectrique.
3. Calculer le travail d'extraction $W_{\text{extraction}}$ d'un électron pour le cuivre.
4. Observe-t-on l'effet photoélectrique pour le cuivre si on l'illumine avec une radiation de longueur d'onde $\lambda = 350 \text{ nm}$?

Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- Charge élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

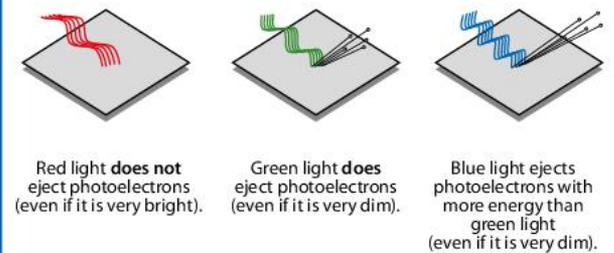
16 Photoelectric effect

| Pratiquer une langue vivante étrangère.

In 1914, the American physicist Robert MILLIKAN, found that light with frequencies below a certain cutoff value, called the *threshold frequency*¹, would not eject photoelectrons from the metal surface no matter how bright the source was. These results were completely unexpected.

Given that it is possible to extract electrons with light and that the energy in a beam² of light is related to its intensity, classical physics would predict that a more intense beam of light would eject electrons with greater energy than a less intense beam no matter what the frequency.

This was not the case, however.



Actually, maybe these results aren't all that typical and would change with different metals. Most metals have threshold frequencies that are in the ultraviolet spectrum and only a few are low enough to reach the visible spectrum and be green or blue like the example shown above.

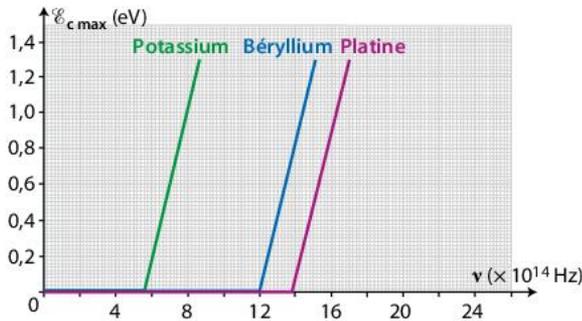
Vocabulary: 1. *threshold frequency*: fréquence de seuil. 2. *beam*: rayon.

1. What does the threshold frequency represent?
2. Explain in what way the results were surprising back in the day.
3. Would the pictures be identical no matter the metal?

17 Comparaison de l'effet photoélectrique

| Extraire et organiser l'information ; effectuer des calculs.

Voici, pour divers métaux, l'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{c,max}$ d'électrons arrachés par effet photoélectrique en fonction de la fréquence ν de la radiation d'éclairement.



1. Pour quel(s) métal(métaux), l'effet photoélectrique se produit-il avec des radiations lumineuses du domaine du visible ?

2. a. Établir, par un bilan d'énergie, l'expression de l'énergie cinétique maximale des électrons en fonction de la fréquence de la radiation incidente.

b. Expliquer pourquoi les différentes courbes sont des droites qui ont le même coefficient directeur et des ordonnées à l'origine différentes.

c. Exploiter ces courbes pour déterminer la constante de Planck h et le travail d'extraction $W_{extraction}$ d'un électron pour chacun des métaux.

Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

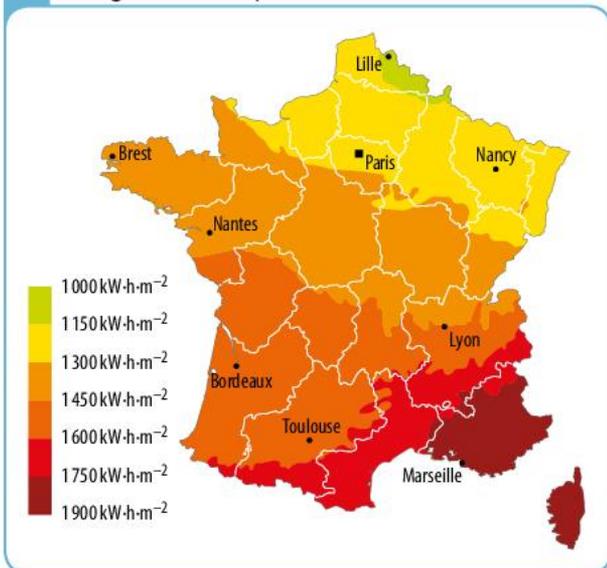
18 Résolution de problème

Une maison autonome ?

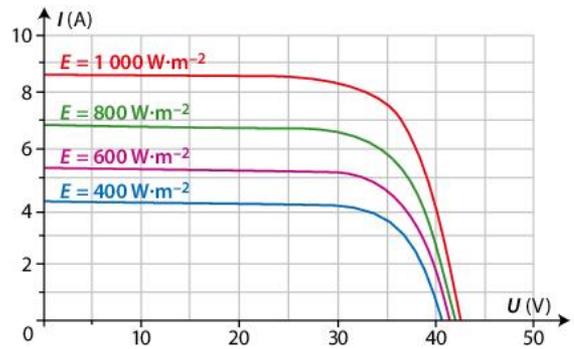
| Construire les étapes d'une résolution de problème.

• L'installation de 10 panneaux photovoltaïques couvre-t-elle les besoins de l'habitation située près de Bordeaux où l'ensoleillement moyen est de 2 050 heures par an ?

A Énergie lumineuse par m^2 sur une année



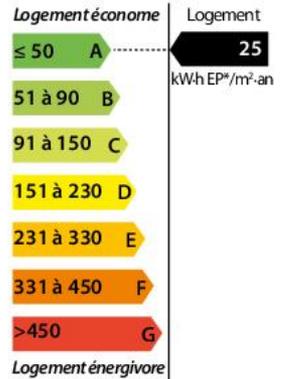
B Caractéristique intensité-tension pour une température de 25 °C



La surface d'un panneau de cellules est $S = 1,46 \text{ m}^2$.

C Diagnostic énergétique d'une habitation

Diagnostic énergétique global d'une habitation récente de 120 m^2 située à proximité de Bordeaux. La maison est « tout électrique ».



* EP : énergie primaire

19 Python

Programmons l'effet photoélectrique

| Utiliser un langage de programmation.

Un programme permet de déterminer si une radiation de longueur d'onde choisie génère l'effet photoélectrique. Si l'effet photoélectrique est observé, le programme indique alors l'énergie cinétique maximale et la valeur maximale de la vitesse des électrons arrachés.

➔ PROGRAMME Python – Lien p. 134

1. Quelle ligne du programme traduit la conservation d'énergie lors de l'effet photoélectrique ?

2. Mettre en œuvre le programme.

a. Pour une longueur d'onde de radiation incidente $\lambda = 530 \text{ nm}$, pour quels métaux l'effet photoélectrique est-il observé ?

b. Pour une radiation de fréquence $\nu = 1,30 \times 10^{15} \text{ Hz}$, déterminer pour quel élément chimique l'effet photoélectrique n'a pas lieu.

3. Pour le métal calcium et une longueur d'onde de radiation $\lambda = 280 \text{ nm}$, vérifier que les valeurs affichées pendant l'exécution du programme respectent la conservation de l'énergie lors de l'effet photoélectrique.

Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- Masse d'un électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

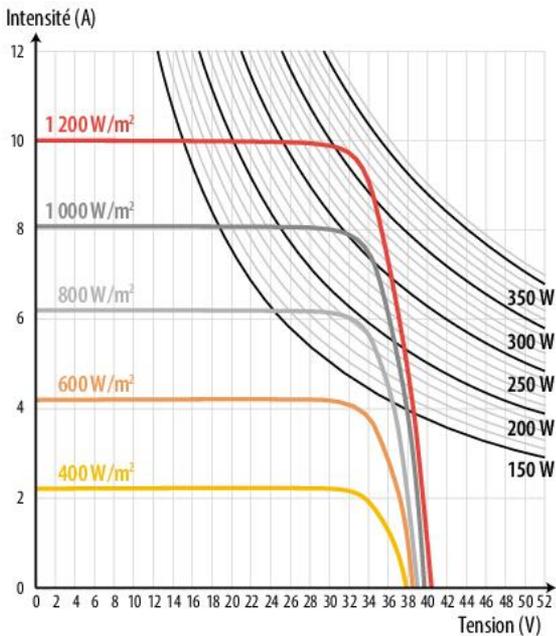
20 Production électrique

Exploiter des informations ; effectuer des calculs ; faire preuve d'esprit critique

Des informations relatives à un panneau photovoltaïque sont reproduites ci-dessous.

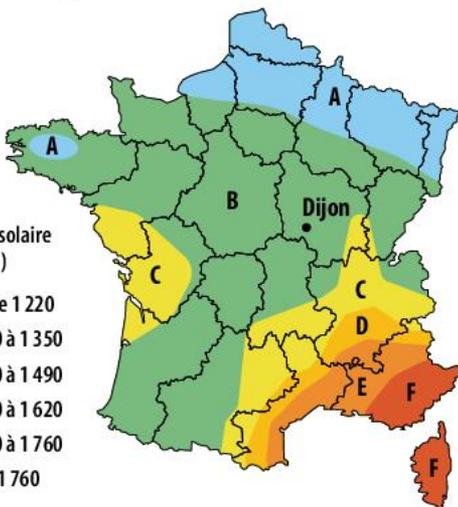
A Un panneau photovoltaïque

Modèle : PW60HT-C-XF
 Taille du panneau : 1 675 mm × 992 mm
 Nombre de cellules : 120
 Cadre : Alliage d'aluminium
 Température de fonctionnement : -40°C à +85°C
 Fusible en série : 30 A
 Caractéristiques à 25 °C :



B Ensoleillement en France métropolitaine

Le gisement solaire est l'énergie solaire moyenne qui irradie chaque mètre carré en une année.



C Parc photovoltaïque et électricité photovoltaïque

En 2019, la production d'électricité par le photovoltaïque raccordé au réseau électrique a été de 12 TW·h.



D Réacteur nucléaire et électricité nucléaire

Une centrale nucléaire génère de l'électricité grâce à la fission des noyaux atomiques, principalement des noyaux d'uranium.

La chaleur produite lors de la fission sert à vaporiser de l'eau, cette vapeur entraînant la rotation d'une turbine qui produit de l'électricité.

En 2019 la production d'électricité par le nucléaire a été d'environ 380 TW·h, cela représente environ 71 % de la production totale française.



1. Représenter la chaîne énergétique d'un panneau photovoltaïque et celle d'une centrale nucléaire.
2. a. Expliquer comment est construit le réseau de courbes grises et noires du document A.
 b. Déterminer la puissance maximale du panneau du document A pour un éclairement de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
 c. Déterminer le rendement du panneau solaire.
 d. Montrer que l'ensoleillement en France métropolitaine permet d'espérer une production électrique annuelle moyenne d'environ $2 \times 10^2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ pour des panneaux de même type que celui du document A.
3. a. Évaluer la surface de panneaux photovoltaïques du même type que celui du document A qui permettrait d'obtenir la même production électrique que les centrales nucléaires françaises de 2019.
 b. La comparer avec la surface actuelle que l'on peut évaluer à partir des informations du document B en considérant que les panneaux utilisés ont des rendements proches de ceux des panneaux du document A.

Ne pas oublier l'existence d'une énergie minimale pour l'effet photoélectrique

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} < W_{\text{extraction}}$$

Pas d'extraction d'électron, pas d'effet photoélectrique

Énergie d'un photon

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} > W_{\text{extraction}}$$

Extraction d'un électron libre proche de la surface du métal, effet photoélectrique

Pour comparer des énergies, il faut qu'elles soient exprimées dans la même unité (eV ou J).

Écrire correctement le rendement

- Attention à ne pas inverser numérateur et dénominateur !

$$\eta = \frac{P_{\text{élec}}}{P_{\text{lum}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{élec}}}{\mathcal{E}_{\text{lum}}}$$

- Le numérateur et le dénominateur doivent être dans la même unité. Le rendement n'a pas d'unité.
- Un rendement est toujours inférieur à 1.

Préparation à l'écrit

→ Les bons réflexes 1 et 2 sont présentés p. 136

21 40 min Installation de panneaux photovoltaïques

| Exploiter des mesures ; effectuer des calculs.

D'après Concours GEIPI, 2013

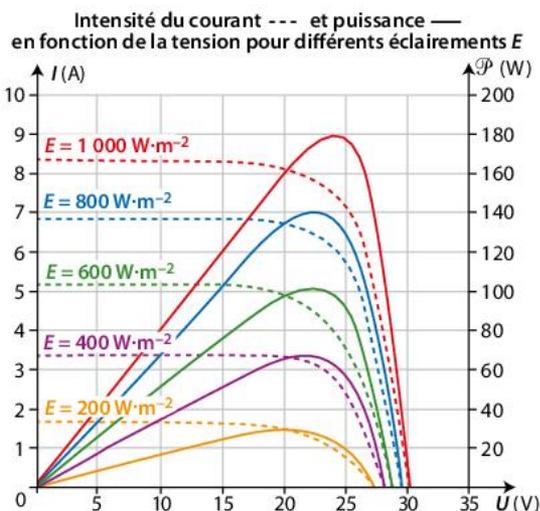
L'énergie solaire est de plus en plus exploitée dans la production d'électricité. On utilise pour cela l'effet photoélectrique se produisant dans des cellules photovoltaïques.

Un habitant de Lyon souhaite équiper le toit de sa maison de panneaux photovoltaïques. Un extrait de la notice technique d'un panneau proposé par l'installateur est donné ci-après.

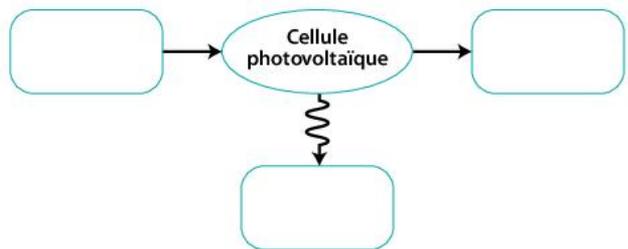


A Extrait de la notice d'un panneau photovoltaïque

- Panneau de 48 cellules associées en série.
- Dimensions du panneau : 1 318 mm × 994 mm.
- Caractéristiques électriques :



1. Recopier et compléter la chaîne énergétique d'une cellule photovoltaïque.



2. On s'intéresse à la situation dans laquelle l'éclairement est de $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.
 - a. Quelle est la puissance maximale fournie par le panneau proposé par l'installateur ?
 - b. Quelle est la tension aux bornes du panneau lorsque la puissance fournie est maximale ?
 - c. Quelle est alors l'intensité du courant électrique ?
3. Déduire des réponses précédentes le rendement maximal du panneau pour un éclairement de $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Utiliser le réflexe 2

4. L'installation doit produire 3,5 kWc (le kilowatt crête, kWc, est une unité de mesure de la puissance maximale produite lorsque l'éclairement est de $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$).
 - a. Combien de panneaux seront nécessaires ?
 - b. En tenant compte du rendement des panneaux, mais aussi de leur orientation et des pertes électriques, l'installateur prévoit un rendement global de 10 %.

Quel revenu annuel cet habitant de Lyon pourra-t-il espérer de la revente de l'électricité produite ?

Coup de pouce QR Code p. 134

Données

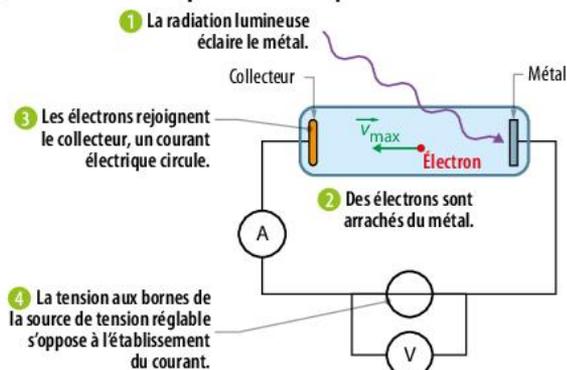
- Prix de vente de l'électricité par ce particulier : 0,20 €/kW·h.
- Énergie lumineuse par unité de surface reçue à Lyon cumulée sur une année : $1\,450\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$.

22 20 min Effet photoélectrique

| Exploiter des observations et des mesures.

L'effet photoélectrique (schéma A) a été découvert à la fin du XIX^e siècle.

A Étude de l'effet photoélectrique



La mesure de la tension annulant le courant électrique permet de calculer la valeur maximale de la vitesse des électrons extraits du métal.

1. Une radiation de longueur d'onde $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ permet d'extraire des électrons d'une cathode en potassium. Quelle est l'énergie d'un photon associé à cette radiation ?
2. Une radiation de longueur d'onde $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$ ne permet pas d'extraire des électrons, même si on augmente l'intensité lumineuse reçue par la cathode ou la durée de l'éclairement. Comment expliquer cette observation ?
3. Pourquoi l'effet photoélectrique a-t-il remis en cause le modèle ondulatoire de la lumière ?
4. Quelle est la valeur maximale de la vitesse d'un électron arraché à du potassium par une radiation de longueur d'onde $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$? Utiliser le réflexe 1
5. Reproduire le schéma A et indiquer la polarité de la source de tension permettant d'annuler le courant.

Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- Pour le potassium : $W_{\text{extraction}} = 2,29 \text{ eV}$.
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- Masse d'un électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

23 40 min De la cellule au panneau photovoltaïque

| Exploiter des mesures ; effectuer des calculs.

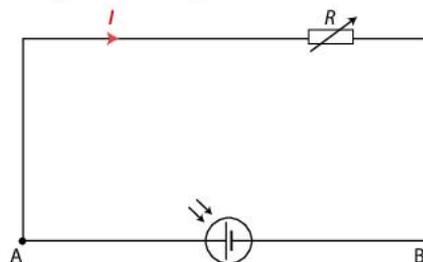
Le rendement d'une cellule photovoltaïque est un paramètre important à prendre en compte lors de la mise au point de dispositifs destinés à produire de l'électricité à partir de la lumière.



Partie I Rendement d'une cellule

Une cellule photovoltaïque est éclairée par une source fournissant un éclairement connu.

1. Le schéma électrique du montage est partiellement représenté ci-dessous. Le reproduire et le compléter en fléchant la tension U_{AB} aux bornes de la cellule photovoltaïque et en ajoutant les appareils de mesure nécessaires.



2. Pour deux éclairements différents, on obtient les résultats ci-dessous.

Pour un éclairement de $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$U_{AB} \text{ (V)}$	0,71	0,66	0,58	0,54	0,46	0,26	0,12	0
$I \text{ (mA)}$	0	20	40	52	70	77	78	80

Pour un éclairement de $1\,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$U_{AB} \text{ (V)}$	0,78	0,72	0,66	0,59	0,50	0,35	0,25	0
$I \text{ (mA)}$	0	40	80	120	150	155	158	160

Représenter sur un même graphique les caractéristiques $I = f(U_{AB})$ de cette cellule pour les deux éclairements.

3. a. Compléter ces tableaux en calculant la puissance électrique $\mathcal{P}_{\text{elec}}$ de cette cellule dans chacune des situations.
b. Représenter sur un même graphique la puissance électrique $\mathcal{P}_{\text{elec}} = f(U)$ de cette cellule pour les deux éclairements.
4. Pour chacun des éclairements :
a. Calculer le rendement maximal de la cellule.
b. Pour quelle tension aux bornes de la cellule le rendement maximal est-il obtenu ?
c. Quelle est alors l'intensité du courant électrique fourni par chaque cellule ?

Partie II Association de cellules

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sont mesurées suivant les normes en vigueur, c'est-à-dire notamment avec un éclairement de $1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. La puissance électrique maximale de la cellule étudiée est obtenue pour une tension de $0,52 \text{ V}$ aux bornes de la cellule. L'intensité du courant électrique produit par la cellule est alors de 112 mA .

Un fabricant désire construire un panneau photovoltaïque en associant 30 cellules identiques.

Le rendement est-il meilleur avec l'association en série ou avec l'association en dérivation ?

Coup de pouce QR Code p. 134

Donnée

Dimensions de la cellule : $4,2 \text{ cm} \times 4,2 \text{ cm}$.

Isolation d'une maison

Utiliser un modèle pour prévoir ; effectuer des calculs ; interpréter des observations.

Une chambre située au dernier étage d'une maison comporte un plafond de surface $S_1 = 14 \text{ m}^2$ et constitué d'un assemblage de briquettes alvéolées d'épaisseur $e_1 = 5,0 \text{ cm}$. Afin d'améliorer l'isolation thermique de cette chambre, depuis les combles, le propriétaire envisage de recouvrir le plafond de plaques de laine de roche d'épaisseur $e_2 = 200 \text{ mm}$.



A Résistances thermiques

Matériau de surface S	Résistance thermique R_{th} ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)
Couche de brique alvéolée d'épaisseur e_1	$7,1 \times 10^{-3}$
Plaque de laine de roche d'épaisseur e_2	$4,1 \times 10^{-1}$

La résistance totale d'un assemblage constitué de deux couches accolées est égale à la somme des résistances thermiques de chacune des couches.

Données

- Masse de l'air dans la chambre : $m = 39 \text{ kg}$.
- Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$.
- Pour l'air, dans la situation étudiée :
 - coefficient d'échange convectif $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 - $c = 1,0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

1. Indiquer les modes de transferts thermiques présents entre le logement et l'extérieur.

2. Un jour d'hiver, dans les combles de la maison, la température est $\theta_{\text{combles}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; celle de l'air dans la chambre située en-dessous est maintenue à $\theta_c = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ par le chauffage.

a. Calculer le flux thermique Φ_1 à travers le plafond de la chambre constitué des seules briquettes.

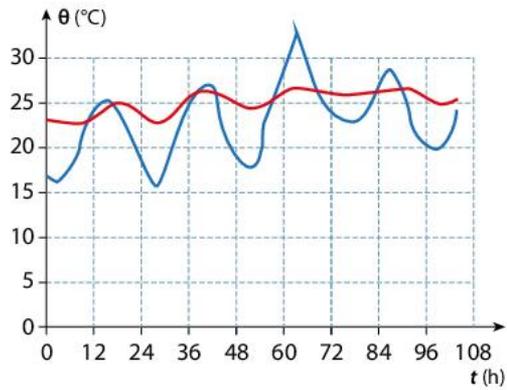
b. Quel serait le flux thermique Φ_2 à travers le plafond de la chambre en présence de laine de roche ?

c. La couche de laine de roche supplémentaire serait-elle efficace ?

3. Le plafond est maintenant isolé. On relève en été (graphique B) les températures θ de l'air à l'intérieur de la chambre et θ_e de l'air à l'extérieur durant quelques jours pendant lesquels la maison est inoccupée, fenêtres et volets fermés et sans climatiseur. Une bonne isolation permet de réduire les fluctuations de température au sein de l'habitation par rapport à celles de l'air extérieur. Les relevés confirment-ils la conclusion sur l'efficacité de la couche de laine de roche de la question 2.c. ?

4. Un matin d'été, l'air intérieur de la chambre est initialement à la température $\theta_i = 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La fenêtre de surface $S = 2,0 \text{ m}^2$ est fermée mais les volets sont restés ouverts.

B Relevés de température de l'air à l'intérieur de la chambre et de l'air extérieur



Dans cette question, on étudie uniquement le transfert thermique convectif entre l'air intérieur de la chambre supposé incompressible et la face intérieure de la vitre. Le temps de l'étude, la température de cette face de la vitre est $\theta_{\text{vitre}} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et est considérée constante.

a. Exprimer le transfert thermique Q entre le système {air intérieur} et la vitre constituant un thermostat, en fonction du flux thermique Φ supposé constant pendant une durée très courte Δt .

b. En appliquant le premier principe de la thermodynamique, établir l'expression de Q en fonction de la masse m du système, de sa capacité thermique massique c et de sa variation de température $\Delta\theta$.

c. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système et montrer que cette température est donnée par :

$$\theta = (\theta_i - \theta_{\text{vitre}}) \times e^{a \times t} + \theta_{\text{vitre}} \text{ avec } a = -\frac{h \times S}{m \times c}.$$

d. Au bout d'une heure, calculer la température de l'air intérieur de la chambre et conclure sur la nécessité de faire poser une vitre isolant plus efficacement la chambre de l'air extérieur.

Nuisances sonores aériennes

Exploiter des schémas ; effectuer des calculs ; interpréter des observations.

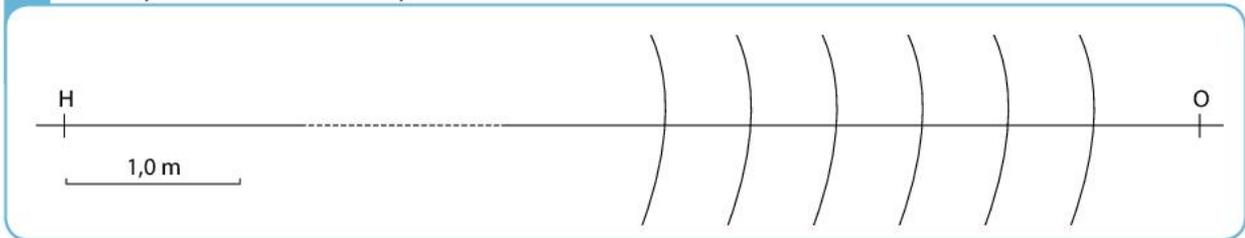
Un hélicoptère se dirige vers une piste d'atterrissage à basse altitude et à une vitesse constante. Il émet une onde sonore de fréquence f_0 . Un observateur immobile, positionné sur la piste perçoit cette onde avec une fréquence f' .

On se place dans un référentiel terrestre.

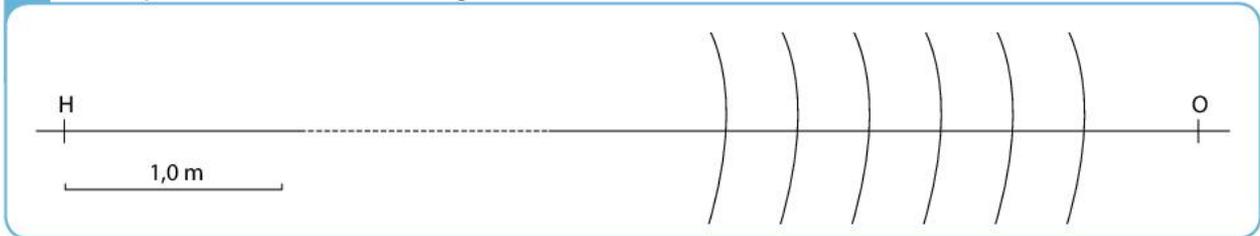
Les portions de cercles des schémas ci-dessous donnent les maxima d'amplitude des ondes sonores à un instant donné. Le point H modélise l'hélicoptère.



A L'hélicoptère est immobile sur la piste



B L'hélicoptère est en mouvement rectiligne uniforme vers l'observateur situé en O



1. a. Déterminer :
 - la longueur d'onde λ_0 de l'onde sonore perçue par l'observateur lorsque l'hélicoptère est immobile ;
 - la longueur d'onde λ' du son perçu par l'observateur lorsque l'hélicoptère est en mouvement rectiligne uniforme.
- b. En déduire :
 - la fréquence f_0 de l'onde sonore émise par l'hélicoptère ;
 - la fréquence f' du son perçu par l'observateur lorsque l'hélicoptère est en mouvement.
- c. Déterminer le décalage Doppler et discuter de son signe.
2. Calculer la valeur $v_{\text{hélico}}$ de la vitesse de l'hélicoptère lorsqu'il se rapproche de la piste.
3. À 5 m, le niveau d'intensité sonore L_1 du son produit par l'hélicoptère est 97 dB. À 10 m, l'intensité sonore I_1 de ce son est égale à $1,2 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
 - a. Calculer le niveau d'intensité sonore L_2 du son à 10 m de l'hélicoptère.
 - b. En déduire l'atténuation du signal.

4. Pour protéger l'oreille, il est possible d'utiliser un casque antibruit actif. Un microphone positionné sur le casque capte le son extérieur et un circuit électronique crée un signal électrique en opposition de phase avec le son capté. Le casque convertit ce signal en un son qui se superpose au son extérieur. Quel phénomène physique explique l'atténuation du niveau sonore par un casque antibruit actif ? Illustrer la réponse par un schéma.
5. À proximité de la piste, le son de l'hélicoptère est perçu dans un hangar dont la porte coulissante, est ouverte sur 80 cm de large. L'hélicoptère est immobile.
 - a. Pourquoi le phénomène de diffraction peut-il être pris en compte ?
 - b. Déterminer l'angle caractéristique de diffraction θ .

Données

- Célérité du son dans l'air $v_{\text{son}} = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Relation entre le décalage Doppler Δf et la valeur de la vitesse $v_{\text{hélico}}$:

$$\Delta f = f_0 \times \frac{v_{\text{hélico}}}{v_{\text{son}} - v_{\text{hélico}}}$$

- $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Chapitre 1

QCM

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.

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

Le vecteur vitesse de M à la date t est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$$

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

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

Il vient, en $m \cdot s^{-1}$:

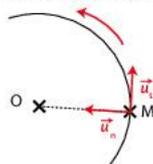
$$\vec{v} \begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = 0 \\ v_y = \frac{dy}{dt} = -4,9 \times 2t + 4,0 = -9,8t + 4,0 \end{cases}$$

Le vecteur accélération de B à la date t est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

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

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

8

\vec{a} Direction : celle de la trajectoire
Sens : celui du mouvement

$\vec{a} = \vec{0}$

\vec{a} Direction : celle de la trajectoire
Sens : opposé à celui du mouvement

10. Le mobile est soumis à son poids \vec{P} et à 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 $m\vec{a}_G = \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$: dans le référentiel galiléen considéré, le mouvement du centre de masse G du mobile est rectiligne uniforme.

12. 1. 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 $\vec{a}_M = \frac{\vec{f}}{m}$.

$\vec{a}_M \begin{cases} \text{direction et sens : ceux de } \vec{f} \\ \text{valeur : } a_M = \frac{f}{m} = 0,333 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$

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

$$a_G = \frac{\left(\frac{800 \times 10^3}{3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}\right)^2}{10000 \text{ m}} \text{ soit } a_G = 4,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

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

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

$$\Sigma F = 50 \times 10^3 \text{ kg} \times \frac{\left(\frac{800 \times 10^3}{3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}\right)^2}{10000 \text{ m}}, \text{ soit } \Sigma F = 2,5 \times 10^5 \text{ N}$$

22. 1. Le vecteur vitesse de D à la date t est la dérivée du vecteur position par rapport au temps : $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OD}}{dt}$ et a pour coordonnée verticale $v_z = \frac{dz}{dt}$. D'où $v_z = 1,0 \times 2t = 2,0t$.

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 : $a_z = \frac{dv_z}{dt}$. Doù $a_z = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. La courbe à

tracer est une droite parallèle à l'axe des abscisses (échelles conseillées : 1 cm \leftrightarrow 0,5 s et 1 cm \leftrightarrow 1,0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

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

25 Partie I

1. Schéma des forces qui s'exercent sur le système {ampoule en mouvement} :



2. Deuxième loi de Newton appliquée au système dans un référentiel terrestre supposé galiléen, $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}_G$.

$$\vec{P} + \vec{f} + \vec{R}_p = m\vec{a}_G$$

On projette ces vecteurs sur l'axe vertical orienté vers le bas : $P - f - R_p = m \times a_G$.

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

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

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

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 à 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

$$A = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times$$

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

soit $A = 9,55 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

$$B = \frac{8,8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}{12,0 \times 10^{-3} \text{ kg}} \text{ soit } B = 0,73 \text{ s}^{-1}$$

Partie II

1. 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 $v_\ell = 13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

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 : $\vec{a}_G = \frac{dv_G}{dt}$.

Quand la vitesse limite est atteinte, $v_G = \text{cste}$ et donc $\vec{a}_G = \frac{dv_G}{dt} = \vec{0}$.

On obtient donc $a_G = A - B \times v_\ell = 0$.

Finalement, $v_\ell = \frac{A}{B}$.

$$v_\ell = \frac{9,55 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{0,73 \text{ s}^{-1}} \text{ soit } v_\ell = 13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

ce qui est en accord avec les mesures de la question 1.

26 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 :

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

Chapitre 2

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 l'accélération normale : $a_G = \frac{v^2}{R}$. Le pointage permet de déterminer la valeur de la vitesse. On relève, entre deux positions successives de G et avec l'échelle indiquée : 3,6 m.

Et donc : $v = \frac{G_i G_{i+1}}{\Delta t}$ soit $v = 0,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. On relève sur le schéma de l'ascenseur un rayon $R = 12 \text{ m}$.

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

$$a_G = 1,2 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

La valeur a_G est très inférieure au centième de g : le roulis est négligeable.

27 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 :

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

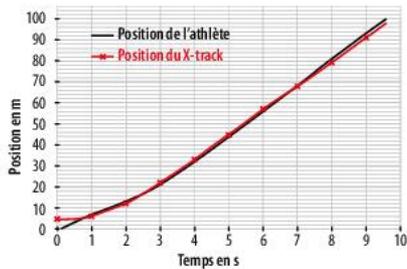
La valeur v de la vitesse du X-track est bien une fonction linéaire du temps.

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. b. 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 $t = 9,58 \text{ s}$,

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

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.

QCM

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

2. 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.

4 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 du champ électrique E est inversement proportionnelle à la distance d entre les armatures. Lorsque d augmente, E diminue.

6 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, $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}$ 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 terrestre.

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

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

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

2. Le vecteur position initiale a pour coordonnées :

$$\vec{OG}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 2,0 \text{ m} \end{cases}$$

Le vecteur vitesse initiale a pour coordonnées :

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

10 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 balle :

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

12 1. Il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération, puis appliquer les conditions initiales indiquées.

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

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

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

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. Il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur vitesse, puis appliquer les conditions initiales indiquées. On assimile le ballon à un point matériel P.

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OP}}{dt}, \text{ donc :}$$

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

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

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

Les équations horaires du mouvement du ballon s'écrivent :

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

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

$$\Delta \mathcal{E}_{m_A \rightarrow B} = \mathcal{E}_{m_B} - \mathcal{E}_{m_A} = 0$$

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

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

Avec $z_B = H$, $v_A = v_0$ et $z_A = 0 \text{ m}$, il vient

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

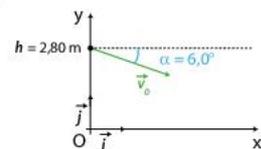
$$\frac{1}{2}v_B^2 + g \times H - \frac{1}{2}v_0^2 = 0.$$

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

$$\mathbf{3.} \quad v_B = \sqrt{\left(\frac{126 \times 10^3 \text{ m}}{3600 \text{ s}}\right)^2 + 2 \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 2,7 \text{ m}}$$

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

16 1. Schématisation à $t = 0 \text{ s}$:



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, $\vec{P} = m \times \vec{a}$ avec $\vec{P} = m \times \vec{g}$. Il vient $\vec{a} = \vec{g}$.

3. Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération sont :

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

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.

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

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

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.

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

De plus $\overrightarrow{OB_0} \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = h \end{cases}$

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

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

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

4. De l'équation horaire $x = v_0 \times \cos \alpha \times t$, on obtient $t = \frac{x}{v_0 \times \cos \alpha}$.

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

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

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 1. Le système étudié est le centre de masse de la bille dans un référentiel terrestre supposé galiléen. La bille n'est soumise qu'à son poids \vec{P} puisque 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 $\vec{a} = \vec{g}$.

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

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

18 1. Dans un condensateur plan, on peut faire varier la valeur absolue de la tension U ou la distance d entre les plaques pour modifier la valeur du champ électrique.

2. Pour $\alpha = 0^\circ$, si la valeur de la vitesse initiale v_0 augmente alors l'électron va plus loin, la trajectoire est plus « aplatie ».

Pour $\alpha = 0^\circ$, si la valeur E du champ diminue alors l'électron va plus loin, la trajectoire est plus « aplatie ».

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

4. L'équation de la trajectoire est :

$$y = \frac{q \times E}{2m \times (v_0 \times \cos \alpha)} \times x^2 + \tan \alpha \times x, \text{ soit de la}$$

forme $y = a \times x^2 + b \times x$.

Pour le proton $m = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ et $q = e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ainsi le coefficient a est positif donc la parabole est concave. En outre, plus ce coefficient est grand, plus la parabole est incurvée donc quand E diminue ou v_0 augmente, a diminue, la parabole est moins incurvée, ce qui est en accord avec les observations du 2.

5. Par tâtonnement, on trouve une valeur $\alpha = 27^\circ$.

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

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 $F = |-e| \times E$

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

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

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

$\frac{F}{P} = 4,5 \times 10^{16}$. 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 :

$$\Delta \mathcal{E}_{O \rightarrow A} = \mathcal{E}_{cA} - \mathcal{E}_{cO} = W_{O \rightarrow A}(\vec{F})$$

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

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

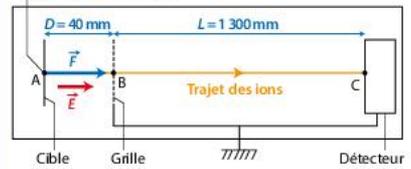
D'où $v_A = \sqrt{\frac{-2e \times U_{OA}}{m_e}}$ avec U_{OA} négative.

$$4. v_A = \sqrt{\frac{-2 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times (-50 \times 10^3 \text{ V})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} \\ v_A = 1,3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

22 1. a. Pour que les fragments F_i^+ de charge q_i soient accélérés de la cible vers la grille, la force électrique \vec{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} .

Zone de départ des ions



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 :

$$\Delta \mathcal{E}_{cA \rightarrow B} = \mathcal{E}_{cB} - \mathcal{E}_{cA} = W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$$

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

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

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

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

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.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ donc } v_x = \frac{e}{m} \times E \times t + C_x; \text{ de plus } \vec{v}_0 = \vec{v}_A$$

avec $v_{x0} = 0$. Il vient $\frac{e}{m} \times E \times 0 + C_x = 0$ 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,

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt} \text{ donc } x = \frac{e}{2m} \times E \times t^2 + D_x; \text{ de plus } x_0 = 0 \text{ m;}$$

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 Δt_{AB} telle que $D = \frac{e}{2m} \times E \times (\Delta t_{AB})^2$, on a donc $\Delta t_{AB} = \sqrt{\frac{2D \times m}{e \times U}}$.

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

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.

2.3 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 (O, x, y) .

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.

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

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.

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

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

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

Les équations horaires du mouvement du ballon

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

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 :

$x_1 = \sqrt{\frac{2v_0^2 \times (h-r)}{g}}$ 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 :

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

$x = 17,5 \text{ m}$ 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_{sol} position du centre de masse du ballon lorsqu'il touche le sol :

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

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

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

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 $22,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

7. Les frottements dus à l'air font que le ballon ira moins loin et touchera le sol avec une vitesse de valeur plus faible.

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 adverse 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.

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

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.

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

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

Le ballon met $0,76 \text{ s}$ pour atteindre une altitude de 80 cm .

Valeur de la vitesse moyenne de l'adversaire

Le joueur a une abscisse initiale de $17,0 \text{ m}$ et doit atteindre en $0,76 \text{ s}$ 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 $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Chapitre 3

QCM

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Or $v = \sqrt{\frac{G \times M_J}{r}}$ 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.

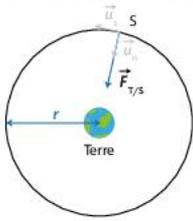
3. On déduit de la relation précédente

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

$$r = \sqrt[3]{\frac{(3,0210^5 \text{ s})^2 \times 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2} \times 1,90 \times 10^{27} \text{ kg}}{4\pi^2}}$$

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

8 1. Soit S le centre de masse du satellite étudié.



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

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

$$\text{Or, } \vec{F}_{T/S} = G \times \frac{m \times M_T}{r^2} \vec{u}_n, \text{ avec le rayon de l'orbite } r = R_T + h \text{ (h est l'altitude de S).}$$

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

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

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

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,

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

Le vecteur vitesse \vec{v} du centre de masse du satellite est tangent à 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 uniforme, on a donc :

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

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

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

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

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(6,4 \times 10^6 \text{ m} + 519 \times 10^3 \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2} \times 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}}}$$

La période de révolution de S est $5,7 \times 10^3 \text{ s}$.

10 1. Dans le référentiel héliocentrique considéré galiléen, la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse P d'une planète donne :

$$\vec{F}_{S/P} = m \vec{a} \text{ et } \vec{F}_{S/P} = G \times \frac{m \times M_S}{r^2} \vec{u}_n, \text{ d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_S}{r^2} \vec{u}_n.$$

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

La coordonnée normale de l'accélération est $a_n = \frac{v^2}{r}$. Par identification, $\frac{v^2}{r} = G \times \frac{M_S}{r^2}$, ainsi

$$v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}.$$

De même pour les autres planètes du système solaire.

2. Le mouvement est uniforme, on a donc :

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

$$\text{Soit } T = \frac{2\pi \times r}{\sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}}, \text{ d'où } T = 2\pi \times r \times \sqrt{\frac{r}{G \times M_S}},$$

$$\text{soit } T = 2\pi \times \sqrt{\frac{r^3}{G \times M_S}}.$$

3. En élevant au carré, $T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_S}$ soit

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_S}. \text{ G et } M_S \text{ sont des constantes donc}$$

$\frac{T^2}{r^3} = \text{cte}$, ce qui vérifie la troisième loi de Kepler dans le référentiel héliocentrique.

4. On isole $M_S : M_S = \frac{4\pi^2}{G \times T^2} \times r^3$. En prenant par exemple les données de Mars, il vient :

$$M_S = \frac{4^{\circ 2} \times (228 \times 10^9 \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2} \times (1,88 \times 3,156 \times 10^7 \text{ s})^2}$$

$$M_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

5. Pour un astre possédant des satellites et connaissant les paramètres orbitaux des satellites, il est possible de déterminer la masse de l'astre attracteur. La troisième loi de Kepler joue le rôle de balance cosmique.

13 1. a. Le nuage de points forme une droite passant par l'origine.

b. Les lignes 37 et 38 permettent de modéliser la courbe.

c. La valeur affectée par défaut au coefficient directeur de cette modélisation est indiquée ligne 35 : $\text{init_a} = 6.00\text{e-}14$

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 linéaire d'équation : $T^2 = a \times r^3$.

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 $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_T} = a$.

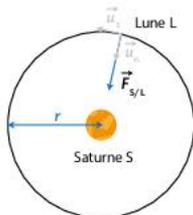
$$\text{On extrait } M_T = \frac{4\pi^2}{G \times a}.$$

$$M_T = \frac{4^{\circ 2}}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2} \times 9,86 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}}$$

La masse de la Terre est $6,00 \times 10^{24} \text{ kg}$.

14 1. a. et b.

Voir schéma ci-dessous.



$$\text{c. } \vec{F}_{S/L} = G \times \frac{m \times M_S}{r^2} \vec{u}_n.$$

2. Dans le référentiel saturnocentrique considéré galiléen, la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse de la Lune donne :

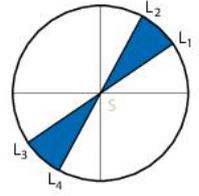
$$\vec{F}_{S/L} = m \vec{a}.$$

$$\text{Or } \vec{F}_{S/L} = G \times \frac{m \times M_S}{r^2} \vec{u}_n \text{ d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_S}{r^2} \vec{u}_n$$

$$\text{3. a. On a donc : } \vec{a} \begin{cases} a_n = G \times \frac{M_S}{r^2} \\ a_t = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \end{cases}$$

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 la lune, balaye 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 $a_n = \frac{v^2}{r}$, on a donc par identification $G \times \frac{M_S}{r^2} = \frac{v^2}{r}$.

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. Le mouvement est uniforme, on a donc

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

$$\text{d'où la période de révolution : } T = 2\pi \times \sqrt{\frac{r^3}{G \times M_S}}.$$

$$\text{b. On isole } M_S : T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_S}$$

$$\text{donc } M_S = \frac{4\pi^2}{G \times T^2} \times r^3$$

$$M_S = \frac{4\pi^2 \times (2,29 \times 10^{10})^3}{6,67 \times 10^{-11} \times (3,54 \times 3,156 \times 10^7)^2}$$

La masse de Saturne est $5,69 \times 10^{26} \text{ kg}$.

6. Si Métis était une lune de Saturne, alors on

$$\text{aurait } \frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3} = \frac{T_L^2}{r_L^3}.$$

$$\text{Calculons } \frac{T_L^2}{r_L^3} \text{ et } \frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3}.$$

$$\frac{T_L^2}{r_L^3} = \frac{(3,54 \times 3,154 \times 10^7 \text{ s})^2}{(2,29 \times 10^{10} \text{ m})^3}$$

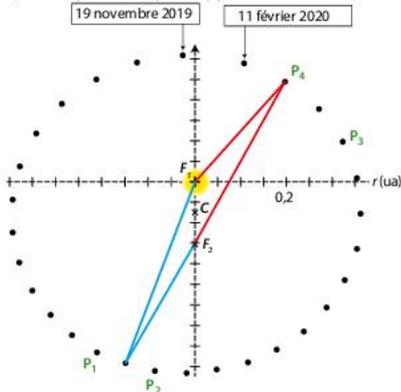
$$\frac{T_L^2}{r_L^3} = 1,03 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^3$$

$$\frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3} = \frac{(0,295 \times 24 \times 3600 \text{ s})^2}{(1,28 \times 10^8 \text{ m})^3} =$$

$$\frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3} = 3,10 \times 10^{-16} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^3$$

$$\frac{T_L^2}{r_L^3} \neq \frac{T_{\text{Métis}}^2}{r_{\text{Métis}}^3}, \text{ donc Métis n'est pas une lune de Saturne.}$$

15 1. Le Soleil est positionné en F_1 , F_2 est le symétrique de F_1 par rapport au centre C.



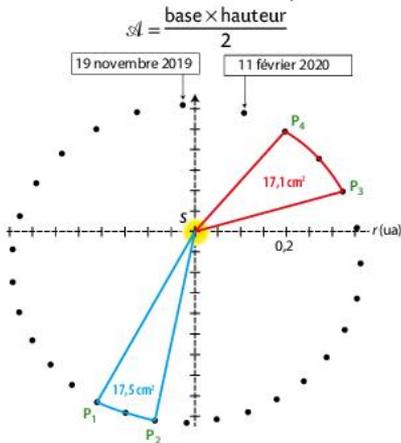
On détermine le rapport $k_i = \frac{P_i F_1 + P_i F_2}{2a}$ pour les 4 positions repérées :

P_i	P_1	P_2	P_3	P_4
k_i	1,03	1,00	1,01	0,99

On a, aux erreurs de mesures près, $MF_1 + MF_2 = 2a$. D'après le doc. D, la trajectoire dans le référentiel héliocentrique est elliptique.

2. a. et **b.** Cf. figure.

L'aire d'un secteur de l'ellipse peut en première approche se calculer comme un triangle dont on mesure base et hauteur sachant que :



On a : $\mathcal{A}_1 = \frac{P_1 P_2 \times SP_1}{2}$ et $\mathcal{A}_2 = \frac{P_3 P_4 \times SP_4}{2}$.

On trouve ici : $\mathcal{A}_1 = 17,5 \text{ cm}^2$ et $\mathcal{A}_2 = 17,1 \text{ cm}^2$.
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 $K = \text{cte}$.

On a bien $\frac{T^2}{r^3} = \text{cte}$. La troisième loi de Kepler est donc vérifiée.

b. Pour les objets célestes du système solaire : $\frac{T^2}{r^3} = K$ avec $K = 3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ (coefficient directeur). On isole r : $r = \sqrt[3]{\frac{T^2}{K}}$

Pour Cérès, $T = 4,5$ ans soit $1,4 \times 10^8 \text{ s}$.

$$D'où : r = \sqrt[3]{\frac{(1,4 \times 10^8 \text{ s})^2}{3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}}}$$

Le rayon de l'orbite de Cérès autour du Soleil est $4,0 \times 10^{11} \text{ m}$.

Chapitre 4

QCM

1. A ; 2. B ; 3. A, B et C ; 4. A ; 5. A ; 6. A ; 7. B ; 8. A ; 9. A ; 10. C.

3 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 est composée de l'énergie cinétique microscopique des particules constituant la plaquette et de l'énergie potentielle microscopique d'interactions qui existent entre ces particules.

- 5** L'énergie potentielle microscopique de l'eau est modifiée.
- L'énergie cinétique microscopique de l'eau reste constante.

7 1. La valeur de la vitesse de la météorite devient constante, donc son énergie cinétique macroscopique, $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m \times v^2$, aussi.

L'énergie potentielle d'interaction avec la Terre (macroscopique), $\mathcal{E}_p = -G \frac{m_{\text{météorite}} \times M_T}{r}$, 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 augmente car celle-ci s'échauffe.

L'énergie potentielle microscopique d'interactions, liée au changement d'état, est également modifiée car la météorite fond en pénétrant dans l'atmosphère.

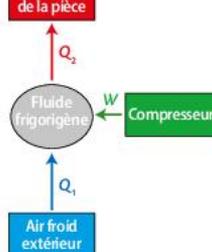
9 1. Le transfert d'énergie de la piste sur les skis s'effectue par travail W , des forces de frottement exercées par la piste sur les skis.

2. Le travail des forces de frottement est résistant $W < 0$; de l'énergie est perdue par le système {ski} et est reçue par la piste. Donc le sens du transfert est du système vers la piste.

11 1. ΔU correspond à la variation d'énergie interne du système ; W et Q sont respectivement l'énergie échangée par travail et 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 et négativement s'ils sont cédés par le système.

13 1.



2. Pour le fluide frigorigène, le premier principe de la thermodynamique s'écrit : $\Delta U = W + Q_1 + Q_2$.

13 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 se refroidit de 5°C , $\theta_f - \theta_i < 0$, et donc $\Delta U_{i \rightarrow f} < 0$.

17 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 θ_1 .

État final : fin de la trempe, le système 1 est à la température θ_f .

L'expression de la variation d'énergie interne du système 1, incompressible, de l'état initial i à l'état final f , est : $\Delta U_1 = m \times c_{\text{alliage}} \times (\theta_f - \theta_1)$.

De même pour le système 2 {eau du bain} :
 État initial : début de la trempe, le système 2 est à la température θ_2 .

État final : fin de la trempe, le système 2 est à la température θ_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 d'énergie 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 $m \times c_{\text{alliage}} \times (\theta_f - \theta_1) = -m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_2)$ soit $m \times c_{\text{alliage}} \times \theta_f - m \times c \times \theta_1 = -m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_f + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2$

$$\text{puis en factorisant par } \theta_f : \theta_f \times (m \times c_{\text{alliage}} + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}}) = m \times c_{\text{alliage}} \times \theta_1 + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2$$

$$\text{Ainsi } \theta_f = \frac{m \times c_{\text{alliage}} \times \theta_1 + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2}{(m \times c_{\text{alliage}} + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}})}$$

$$D'où : \theta_f = \frac{10 \text{ kg} \times 909 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \times 540^\circ\text{C} + 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \times 19^\circ\text{C}}{10 \text{ kg} \times 909 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} + 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}}$$

soit $\theta_f = 20^\circ\text{C}$.

18 1. a. Le système {cuve et cire} passe d'un état initial à la température ambiante θ_a à un état final à la température de fusion de la cire θ_f . La variation d'énergie interne de ce système incompressible est :

$$\Delta U_1 = m_1 \times c_{\text{cire}} \times (\theta_f - \theta_a) + m_0 \times c_{\text{Al}} \times (\theta_f - \theta_a)$$

$$\text{Soit } \Delta U_1 = (m_1 \times c_{\text{cire}} + m_0 \times c_{\text{Al}}) \times (\theta_f - \theta_a)$$

$$\Delta U_1 = (0,100 \text{ kg} \times 3,4 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} + 0,250 \text{ kg} \times 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}) \times (64^\circ\text{C} - 19^\circ\text{C})$$

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. Mais la cire ne fond pas, l'énergie potentielle microscopique d'interactions 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 $W = 0 \text{ J}$. 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 $Q_1 = W_{\text{elec}}$; or $W_{\text{elec}} = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t_1$,
soit $\Delta U_1 = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t_1$.

On en déduit $\Delta t_1 = \frac{\Delta U_1}{\mathcal{P}_{\text{elec}}}$.

$$\Delta t_1 = \frac{2,5 \times 10^4 \text{ J}}{200 \text{ W}}, \Delta t_1 = 1,3 \times 10^2 \text{ s}.$$

3. De même, le transfert thermique pour qu'une fusion totale de la cire se produise est $Q_2 = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t_2$.

D'où $Q_2 = 200 \text{ W} \times 6 \text{ min} \times 60 \text{ s} \cdot \text{min}^{-1}$

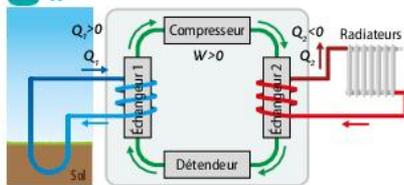
$$\text{soit } Q_2 = 7,2 \times 10^4 \text{ J}.$$

4. Pour la fusion de la cire, au total, $Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2$,

$$\text{d'où } Q_{\text{tot}} = 2,5 \times 10^4 \text{ J} + 7,2 \times 10^4 \text{ J},$$

$$\text{soit } Q_{\text{tot}} = 9,7 \times 10^4 \text{ J}.$$

24 1.



— Circuit d'eau du réseau de captage dans le sol
— Circuit du fluide spécifique dans la PAC
— Circuit d'eau alimentant les radiateurs

2. a. Pour le système (eau des radiateurs), on a : L'état initial : le système est à la température ambiante θ_i .

L'état final : le système est à la température finale θ_f .

La variation d'énergie interne du sous-système 2 incompressible, de l'état initial i à l'état final f , est : $\Delta U_2 = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i)$

$$\text{avec } m_{\text{eau}} = D_m \times \Delta t$$

$$\text{soit } \Delta U_2 = D_m \times \Delta t \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i).$$

$$\text{D'où : } \Delta U_2 = 145 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 4 \text{ h} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (20 \text{ °C} - 12 \text{ °C})$$

$$\text{soit } \Delta U_2 = 1,94 \times 10^7 \text{ J}.$$

b. D'après le premier principe appliqué à l'eau des radiateurs, $\Delta U_2 = Q_{\text{reçu par l'eau}} > 0$ car $W = 0$. Le seul transfert d'énergie reçu par l'eau est un transfert thermique de la part du fluide spécifique. Le fluide lui cède donc $Q_2 = -Q_{\text{reçu par l'eau}}$ soit $Q_2 = -1,94 \times 10^7 \text{ J}$.

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), $\Delta U_{\text{fluide}} = Q + W$.

Ce système, dont l'énergie mécanique ne varie pas, reçoit de l'énergie par travail électrique $W_{\text{elec}} > 0$ et par transfert thermique $Q_1 > 0$ et cède par transfert thermique $Q_2 < 0$.

$$\Delta U_{\text{fluide}} = W_{\text{elec}} + Q_1 + Q_2$$

b. Puisque l'état initial est identique à l'état final au cours d'un cycle : $\Delta U_{\text{fluide}} = 0 \text{ J}$,

$$\text{donc } W_{\text{elec}} + Q_1 + Q_2 = 0 ;$$

$$\text{soit : } Q_1 = -Q_2 - W_{\text{elec}}$$

$$\text{Ainsi } Q_1 = 1,94 \times 10^7 \text{ J} - 4,82 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\text{soit } Q_1 = 1,46 \times 10^7 \text{ J}$$

4. L'énergie utile donnée à l'eau est $-Q_2$, l'énergie facturée est le travail électrique indispensable au fonctionnement du compresseur, donc le rapport est $R = \frac{-Q_2}{W_{\text{elec}}} = \frac{1,94 \times 10^7 \text{ J}}{4,82 \times 10^6 \text{ J}} = 4,02$.

La PAC restitue quatre fois plus d'énergie par transfert thermique qu'elle ne consomme d'énergie par travail électrique.

25 1. a. La variation d'énergie interne du système {crème encapsulée}, incompressible, de l'état initial i (température ambiante θ_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 θ_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_{elec} sous forme de transfert thermique au système, $Q_1 = W_{\text{elec}}$. L'énergie électrique consommée pendant la durée Δt_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

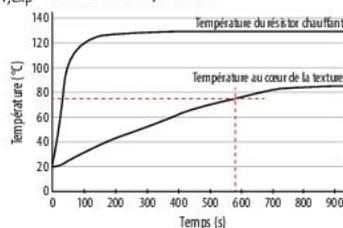
$$\rho \times V \times c \times \Delta\theta = \mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t_1.$$

La durée Δt_1 du chauffage nécessaire pour réaliser ce transfert thermique est donc $\Delta t_1 = \frac{\rho \times V \times c \times \Delta\theta}{\mathcal{P}_{\text{elec}}}$

$$\Delta t_1 = \frac{1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 12,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \times 1,400 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (75 \text{ °C} - 20 \text{ °C})}{15 \text{ W}}$$

$$\Delta t_1 = 77 \text{ s} \text{ soit } 1 \text{ min } 17 \text{ s}.$$

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 $\Delta t_{1,\text{exp}} > 7 \text{ min}$.

Chapitre 5

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.

2 1. et 2. On construit un tableau :

Transfert thermique entre...	Mode principal de transfert thermique	Signe du transfert thermique pour le système
L'eau et le Soleil	Rayonnement	Positif
L'eau et le sable	Conduction	Positif
L'eau et l'air	Convection	Positif

4 1. La température extérieure est supérieure à celle de l'habacle du véhicule. Le transfert thermique a donc lieu depuis l'extérieur vers l'intérieur de la voiture.

2. Calculons le flux thermique :

$$\Phi = \frac{\theta_A - \theta_B}{R_{\text{th}}} = \frac{40 \text{ °C} - 22 \text{ °C}}{3,0 \times 10^{-3} \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}}$$

$$\Phi = 6,0 \times 10^3 \text{ W}.$$

6 S représente la surface d'échange entre le système incompressible et son environnement, l'un des deux étant 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. h est exprimé en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; le flux est exprimé en watt (W).

8 1. Sur une durée courte, on considère le flux Φ comme constant. On peut écrire :

$$Q = \Phi \times \Delta t.$$

Avec, 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, 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 Δt tend vers zéro de $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ est la dérivée de θ par rapport au temps notée $\frac{d\theta}{dt}$.

On en déduit l'équation différentielle vérifiée par θ : $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$.

10 1. Pour une équation différentielle de la forme $y' = ay + b$, les solutions sont de la forme : $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$.

Par comparaison, les solutions de l'équation différentielle sont :

$$\theta = K \times e^{ax} + \theta_e$$

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 θ est :

$$\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{ax} + \theta_e$$

2. Au bout d'une heure :

$$\theta = (180^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \times e^{-3,8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \times 3600 \text{ s}} + 20^\circ\text{C} = 61^\circ\text{C}$$

11 1. Le flux thermique est supposé constant sur un intervalle de temps Δt très court, donc : $Q = \Phi \times \Delta t$. De plus, d'après la loi de Newton, $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$, 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 la température θ_i , dans l'état final à la température θ . Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique Q , le transfert d'énergie sous forme de travail $W = 0$ J.

D'après le premier principe de la thermodynamique, $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$, donc $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$.

De plus pour un système incompressible, $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta\theta$.

On arrive à : $Q = m \times c \times \Delta\theta$

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 t tend vers zéro, la limite de $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ est égale à la dérivée de θ par rapport au temps t . L'équation se réécrit :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e; \text{ c'est l'équation différentielle vérifiée par } \theta.$$

4. Si $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$ est solution de l'équation différentielle, elle vérifie cette équation. On a :

$$\frac{d}{dt} \left((\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e \right)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t}$$

En remplaçant θ et $\frac{d\theta}{dt}$ dans l'équation différentielle vérifiée par θ , on a :

$$\begin{aligned} &-\frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} \\ &= -\frac{h \times S}{m \times c} \times \left((\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e \right) \\ &\quad + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e; \end{aligned}$$

en simplifiant par $-\frac{h \times S}{m \times c}$, l'équation devient :

$$\begin{aligned} &(\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} \\ &= (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e - \theta_e. \end{aligned}$$

L'égalité est vérifiée, la température θ 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 $\theta_f = 30^\circ\text{C}$. $\theta_e = 50^\circ\text{C}$ est la température constante du thermostat. La surface doit être exprimée en m^2 .

$$\text{Donc } \theta_f = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t_f} + \theta_e$$

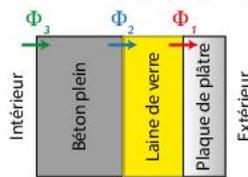
$$D'où t_f = -\frac{m \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right)$$

$$t_f = -\frac{350 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 4,2 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}{300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \times 270 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$\times \ln\left(\frac{30^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}\right);$$

la durée nécessaire est $t_f = 147 \text{ s}$ ou $t_f = 2,45 \text{ min}$; l'indication du fabricant « moins de 3 minutes » est donc conforme.

14 1. Schéma en coupe ($\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_{123}$) :



2. Le mode de transfert thermique à travers les murs est la conduction.

$$3. R_{th} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3},$$

$$\text{soit : } R_{th} = 0,039^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} + 0,125^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} + 0,013^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} = 0,177^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$$

4. Pour un transfert thermique par conduction en régime permanent indépendant du temps,

$$\Phi = \frac{(\theta_{int} - \theta_{ext})}{R_{th}}$$

$$d'où \Phi = \frac{(20^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C})}{0,177^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}} = 85 \text{ W}$$

5. Pour un simple mur en béton :

$$\Phi = \frac{(\theta_{int} - \theta_{ext})}{R_{th3}}$$

$$\Phi = \frac{(20^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C})}{0,013^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}} = 1,2 \times 10^3 \text{ W}; \text{ le simple mur est beaucoup moins isolant.}$$

21 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 Δt_{ref} provient intégralement du travail électrique W_{elec} ; donc $Q = W_{elec}$. Or $W_{elec} = U \times I \times \Delta t_{chauffage}$ et $I = \frac{U}{R}$

$$\text{soit } W_{elec} = \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{chauffage}$$

On sait que $\Delta t_{chauffage} = 0,10 \times \Delta t_{ref}$ d'où

$$W_{elec} = 0,10 \times \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{ref}. \text{ On en déduit } Q = W_{elec} \text{ devient } Q = 0,10 \times \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{ref}.$$

2. Un transfert thermique par conduction et convection se produit de la pièce (plus chaude) vers l'extérieur (plus froid). On a donc :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t_{ref}} = 0,10 \times \frac{U^2}{R}$$

$$\text{A.N. : } \Phi = 0,10 \times \frac{(230 \text{ V})^2}{25,0 \Omega}, \text{ soit } \Phi = 212 \text{ W}$$

3. On a : $\Phi = \frac{T_1 - T_e}{R_{th}}$ et donc $R_{th} = \frac{T_1 - T_e}{\Phi}$

$$\text{Soit } R_{th} = \frac{293 \text{ K} - 273 \text{ K}}{212 \text{ W}}; R_{th} = 0,095 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

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 d'oxygène à énergies cinétiques identiques : les transferts thermiques par convection sont ainsi plus difficiles.

Partie 2

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 $W = 0$ 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 Δt court Φ est supposé constant : $Q = \Phi \times \Delta t$.

Pour un système incompressible, $\Delta U_{i \rightarrow f} = C \times \Delta T$.

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = Q \text{ devient } C \times \Delta T = \Phi \times \Delta t$$

2. De plus, d'après la loi de Newton,

$$\Phi = h \times S \times (T_e - T);$$

$$d'où Q = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$$

$$C \times \Delta T = \Phi \times \Delta t \text{ s'écrit donc aussi :}$$

$$C \times \Delta T = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$$

$$\text{ou } \frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{h \times S}{C} \times T + \frac{h \times S}{C} \times T_e$$

C'est l'équation différentielle vérifiée par la température T du système.

Lorsque Δt 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 pour forme :

$$y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a} \text{ avec } K \text{ un réel et } a \neq 0$$

Ici donc, 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 $T(0) = K + T_e$.

$$T_1 = K + T_e \text{ d'où } K = (T_1 - T_e). \text{ On a donc}$$

$$\text{finalement : } T = (T_1 - T_e) \times e^{-\frac{h \times S}{C} \times t} + T_e$$

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 $T_{fin} = 289 \text{ K}$.

$$t_f = -\frac{100 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}}{10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \times 8,0 \text{ m}^2} \times \ln\left(\frac{289 \text{ K} - 273 \text{ K}}{293 \text{ K} - 273 \text{ K}}\right)$$

soit $\Delta t = 2,8 \times 10^2 \text{ s}$ ou environ 4 min 40 s.

22 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.

$$R_{th} = \frac{1}{S \times U} = \frac{0,125 \times (T_1 - T_e)}{T_1 - T_{Si}} \times \frac{1}{S}$$

$$\text{soit } R_{th} = \frac{0,125 \times (293 \text{ K} - 268 \text{ K})}{293 \text{ K} - 291 \text{ K}} \times \frac{1}{25,0 \text{ m}^2}$$

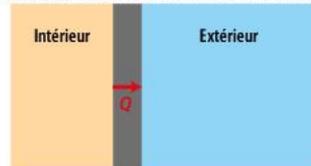
$$R_{th} = 6,25 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

2. Connaissant la résistance thermique, on peut en déduire le flux :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_e}{R_{th}} \text{ d'où } \Phi = \frac{293 \text{ K} - 268 \text{ K}}{6,25 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

$$\Phi = 4,00 \times 10^2 \text{ W}$$

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 :

$$Q = \Phi \times \Delta t = 4,00 \times 10^2 \text{ W} \times 3\,600 \text{ s} = 1,44 \times 10^6 \text{ J}$$

23 1. Il s'agit essentiellement d'un transfert thermique convectif.

2. En présence de duvet 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 $\tau_A = 680 \text{ s}$ et $\tau_B = 240 \text{ s}$ environ grâce au point d'intersection de la tangente à l'origine et de l'asymptote horizontale.

5. a. Avec une calculatrice, on obtient : $\tau = 716 \text{ s}$; $\sigma_{n-1} = 40 \text{ s}$; on en déduit $u(\tau) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$ avec $n = 6$. $u(\tau) = 2 \times 10^1 \text{ s}$.

b. L'encadrement du temps caractéristique de l'expérience A est :

$$7,0 \times 10^2 \text{ s} \leq \tau \leq 7,4 \times 10^2 \text{ s}$$

6. D'après les encadrements des temps caractéristiques, $\tau_A \neq \tau_B$, τ est plus grand, en présence de plumes. Cela confirme que le plumage constitue une couche isolante qui minimise le flux thermique traversant la cloison du milieu intérieur vers le milieu extérieur.

Chapitre 6

QCM

1. C ; **2.** A ; **3.** B ; **4.** C ; **5.** A et C ; **6.** B et C ; **7.** B ; **8.** A ; **9.** C ; **10.** A.

3 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, $L = 79 \text{ dB}$.

3. De même, $L = 94 \text{ dB}$.

5 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	L
$1 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	70 dB
$2 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	73 dB
$1 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	60 dB

6 1. Le phénomène mis en jeu est l'atténuation par absorption.

2. L'atténuation est : $A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$ soit $A = 78 \text{ dB} - 67 \text{ dB}$ soit $A = 11 \text{ dB}$.

8 Seule la situation **c** est une conséquence de l'effet Doppler.

10 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.

12 1. Le décalage Doppler Δf 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**.

14 La valeur de la vitesse du véhicule est donnée par :

$$v = \frac{c \times \Delta f}{2 \times \cos \alpha \times f_E}$$

$$\text{Donc } v = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 6,451 \times 10^3 \text{ Hz}}{2 \times \cos 20^\circ \times 3,40 \times 10^{10} \text{ Hz}}$$

$$\text{soit } v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

19 1. Le niveau d'intensité sonore est donné

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

En utilisant la réciproque de la fonction logarithme, on obtient : $\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}$, puis $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$.

$$\text{Donc } I = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 10^{\frac{115}{10}}$$

$$\text{Soit } I = 3,2 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

2. a. $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$

$$\text{Donc } L = 10 \log\left(\frac{1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

$$\text{soit } L = 80 \text{ dB}.$$

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 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 de déplacement du train se déduit de l'expression du décalage Doppler :

$$\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}} - v}$$

$$\text{Il vient } \Delta f \times (v_{\text{onde}} - v) = f_E \times v.$$

$$\text{Et ensuite } \Delta f \times v_{\text{onde}} = f_E \times v + \Delta f \times v.$$

$$\text{Soit } v \times (f_E + \Delta f) = \Delta f \times v_{\text{onde}}.$$

$$\text{Or } \Delta f = f_R - f_E, \text{ d'où } v \times f_R = (f_R - f_E) \times v_{\text{onde}}.$$

$$\text{Et } v = \frac{f_R - f_E}{f_R} \times v_{\text{onde}}.$$

$$\text{Ce qui s'écrit aussi } v = v_{\text{onde}} \times \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right).$$

$$\text{Donc } v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \left(1 - \frac{440 \text{ Hz}}{464 \text{ Hz}}\right),$$

$$v = 17,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

21 1. D'après la relation entre valeur de vitesse, distance parcourue et durée de parcours,

$$t_2 = \frac{d}{v_{\text{onde}}}.$$

2. a. De même, $d_E = v_E \times T_E$.

b. La distance séparant E et R est

$$d_3 = d + d_E = d + v_E \times T_E.$$

$$\text{c. } t_4 = T_E + \frac{d_3}{v_{\text{onde}}} = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}}.$$

$$\text{3. } T_R = t_4 - t_2 = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}} - \frac{d}{v_{\text{onde}}}$$

$$= T_E + \frac{v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}} = T_E \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{\text{onde}}}\right).$$

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 :

$$f_E \times v_{\text{onde}} = f_R \times (v_{\text{onde}} + v_E)$$

$$\text{d'où } \frac{f_E \times v_{\text{onde}}}{f_R} = v_{\text{onde}} + v_E$$

$$\text{soit } v_E = \frac{f_E \times v_{\text{onde}}}{f_R} - v_{\text{onde}}$$

Finalement :

$$v_E = v_{\text{onde}} \times \left(\frac{f_E}{f_R} - 1\right) = v_{\text{onde}} \times \frac{f_E - f_R}{f_R}.$$

25 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 même unité : Hz ou s^{-1} .

b. Le décalage Doppler est : $\Delta f = f_1 - f_E$

$$\Delta f = f_E \times \frac{c+v}{c} - f_E = f_E \times \left(1 + \frac{v}{c} - 1\right) = f_E \times \frac{v}{c}.$$

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 2b p. 97) : $f_R = f_1 \times \frac{c}{c-v}$.

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 :

$$\Delta f = f_R - f_E = f_E \times \frac{c+v}{c-v} - f_E = f_E \times \left(\frac{c+v}{c-v} - 1\right)$$

$$\Delta f = f_E \times \left(\frac{c+v}{c-v} - \frac{c-v}{c-v}\right) = f_E \times \frac{c+v-c+v}{c-v}$$

$$\Delta f = f_E \times \frac{2v}{c-v}$$

De plus, si $v \ll c$ il vient $c-v \approx c$.

$$\text{Et alors on a } \Delta f = f_E \times \frac{2v}{c} = 2 f_E \times \frac{v}{c}.$$

3. a. L'ordre de grandeur du décalage Doppler est :

$$\Delta f = 2 \times 10^{10} \text{ Hz} \times \frac{10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \approx 10^3 \text{ Hz}.$$

b. L'incertitude-type est uniquement sur la vitesse v ;

$$u(\Delta f) = \Delta f \times \frac{u(v)}{v} = 10^3 \text{ Hz} \times \frac{0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$u(\Delta f) = 10^1 \text{ Hz} ;$$

l'ordre de grandeur de la précision sur Δf 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 :

$$|\Delta f| = \frac{1}{T} \text{ donc } |\Delta f| = \frac{1}{220 \times 10^{-6} \mu\text{s}}$$

$$\text{soit } |\Delta f| = 4,55 \times 10^3 \text{ Hz.}$$

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 $|\Delta f| = (45 \pm 2) \times 10^2$ Hz.

2. Le véhicule se rapproche du radar, $\Delta f > 0$.

3. a. La valeur de la vitesse du véhicule est :

$$v = \frac{c \times \Delta f}{2 \times f_E}$$

$$\text{Donc } v = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 4545 \text{ Hz}}{2 \times 3,0 \times 10^{10} \text{ Hz}}$$

$$\text{soit } v = 23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

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 . Donc :

$$u(v) = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 4\,545 \text{ Hz}}{2 \times 3,0 \times 10^{10} \text{ Hz}} \times \frac{207 \text{ Hz}}{4\,545 \text{ Hz}}$$

$$\text{soit } u(v) = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

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 $u(\Delta f)$.

26 1. a. L'intensité sonore du son reçu par un spectateur placé à 1,0 m de l'enceinte est :

$$I = \frac{P}{S} = \frac{4,0 \times 10^{-1} \text{ W}}{4\pi \times 1,0^2 \text{ m}^2}, \text{ soit } I = 6,4 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

(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 : $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$,

$$\text{donc } L = 10 \log\left(\frac{6,4 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) \text{ soit } L = 108 \text{ dB.}$$

À 4,0 m, le niveau d'intensité sonore sera :

$$L' = 10 \log\left(\frac{I'}{I_0}\right)$$

$$\text{Donc } L' = 10 \log\left(\frac{4,0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

soit $L' = 96$ 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 et à côté de celle-ci, les intensités sonores s'ajoutent : $I'' = 2 \times I'$.

$$\text{Donc, à 4,0 m, } I'' = 2 \times 4,0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\text{soit } I'' = 8,0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

À 4,0 m, le niveau d'intensité sonore sera :

$$L'' = 10 \log\left(\frac{I''}{I_0}\right)$$

$$\text{donc } L'' = 10 \log\left(\frac{8,0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

soit $L = 99$ 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. Calculons l'intensité sonore correspondant au seuil de danger :

$$I''' = I_0 \times 10^{\frac{90 \text{ dB}}{10}}$$

$$\text{Donc } I''' = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 10^{\frac{90 \text{ dB}}{10}}$$

soit $I''' = 1,0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Déterminons 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 m 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 sonore perçu : d'où une impression d'un son perçu plus grave que celui qui est émis.

b. Avec les 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. Lors 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.

Chapitre 7

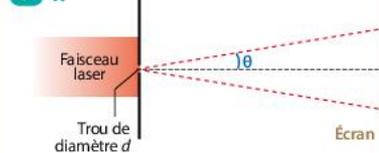
QCM

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.

3 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.

5 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 à travers un rideau.

7 1.



On obtient des anneaux de diffraction avec une tache centrale nettement plus lumineuse que les autres.

2. L'angle caractéristique de diffraction est :

$$\theta = 1,22 \times \frac{\lambda}{d} \text{ d'où } \theta = 1,22 \times \frac{532 \times 10^{-9} \text{ m}}{30 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

$$\text{soit } \theta = 2,2 \times 10^{-2} \text{ rad.}$$

9 Le phénomène d'interférences intervient dans le cas **a** ; on a des interférences destructives.

11 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 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 résultante est petite ; les interférences sont destructives. La surface de l'eau est quasiment immobile. Cette situation correspond à la courbe (b).

13 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 distances parcourues doit être égale à $k \times \lambda$, où k est un entier relatif.

b. Pour observer des interférences destructives, la différence de distances parcourues doit être égale à $\left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$.

15 1. La longueur d'onde λ pour expression :

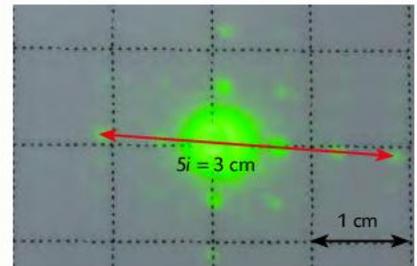
$$\lambda = \frac{i \times b}{D}$$

2. On a : $\lambda = \frac{i \times b}{D}$

$$\lambda = \frac{6,3 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,20 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,0 \text{ m}}$$

$$\text{soit } \lambda = 6,3 \times 10^7 \text{ m.}$$

17 1. L'interfrange i est obtenue à partir de la figure d'interférences :



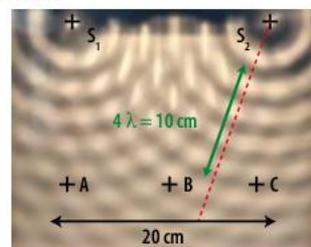
On a $5 \times i = 3,0 \text{ cm}$ d'où $i = 0,60 \text{ cm}$.

2. La largeur d'un pixel est : $a = \frac{\lambda \times D}{i}$

$$\text{Donc } a = \frac{532 \times 10^{-9} \text{ m} \times 1,24 \text{ m}}{0,60 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

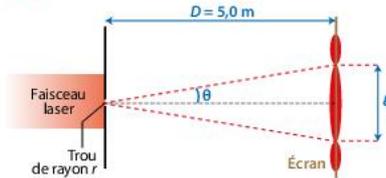
soit $a = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}$. La largeur d'un pixel est d'environ 0,11 mm.

18 1. Sur la photographie, on constate que, suivant une direction de propagation, la longueur égale à 4λ correspond à la moitié de la longueur de l'échelle indiquée. Donc $4\lambda = 10 \text{ cm}$; donc $\lambda = 2,5 \text{ cm}$.

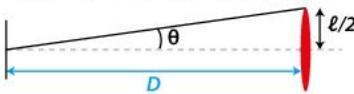


2. Au point A, $d_2 - d_1 = 9,2$ cm. On a : $\frac{d_2 - d_1}{\lambda}$ peut être arrondi à 3,5 ce qui correspond à des interférences destructives car $\Delta L = (k + \frac{1}{2}) \times \lambda$.
 Au point B, $d_2 - d_1 = 0$ cm. On a des interférences constructives pour $k = 0$.
 Au point C, $d_2 - d_1 = -7,7$ cm. On a : $\frac{d_2 - d_1}{\lambda}$ peut être arrondi à -3 ce qui correspond à des interférences constructives car $\Delta L = k \times \lambda$.

19 1.



2. L'expression de l'angle caractéristique θ s'obtient à partir de la tâche centrale de largeur ℓ .



D'après le schéma, on a : $\tan \theta = \frac{\ell}{2D} = \frac{\ell}{2D}$;
 comme l'angle θ est petit, $\tan \theta = \theta$ d'où $\theta = \frac{\ell}{2D}$.

De plus, pour une ouverture circulaire de rayon r et une longueur d'onde λ_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 $\lambda_R = \frac{r \times \ell}{1,22 \times D}$.

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 :

$$\lambda_R = \frac{0,20 \times 10^{-3} \text{ m} \times 2,1 \times 10^{-2} \text{ m}}{1,22 \times 5,0 \text{ m}}$$

$$\lambda_R = 6,9 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

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 λ .

21 1. a. La longueur d'onde λ_0 de la radiation émise par le laser est : $\lambda_0 = \frac{v \times \ell}{D}$

$$\lambda_0 = \frac{6,0 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,20 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,00 \text{ m}}$$

$$\lambda_0 = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

b. L'incertitude-type sur la longueur d'onde est :

$$u(\lambda_0) = \lambda_0 \times \sqrt{\left(\frac{u(v)}{v}\right)^2 + \left(\frac{u(\ell)}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}$$

$$u(\lambda_0) = 6,0 \times 10^{-7}$$

$$\times \sqrt{\left(\frac{0,1}{6,0}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{0,20}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{2,00}\right)^2}$$

$$u(\lambda_0) = 4 \times 10^{-8} \text{ m}$$

2. L'encadrement de la longueur d'onde est : $5,6 \times 10^{-7} \text{ m} < \lambda_0 < 6,4 \times 10^{-7} \text{ m}$.

26 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 α

doit être supérieur à l'angle caractéristique de diffraction θ_{diff} .

2. Pour distinguer la planète 2M1207b de l'étoile 2M1207a, il faut que $\alpha > \theta_{\text{diff}}$ d'où :

$$\frac{r}{d_{\text{Terre-étoile}}} > 1,22 \times \frac{\lambda}{D}$$

$$\text{soit } D > \frac{1,22 \times \lambda \times d_{\text{Terre-étoile}}}{r}$$

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 $D > 0,65$ m.

Le diamètre D de l'ouverture du télescope doit être supérieur à 0,65 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 de parcours d'un des deux chemins optiques est équivalent à allonger ce chemin d'une distance $\frac{\lambda}{2}$. Les ondes sont en opposition de phase, leurs interférences sont destructives.

c. L'intensité du signal issu de l'étoile sera alors 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 τ' 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 $\frac{d \times \sin \alpha}{c} = T \times (k - \frac{1}{2})$

D'où $d \times \sin \alpha = c \times T \times (k - \frac{1}{2})$.

Avec $\lambda = c \times T$, la relation devient :

$$d \times \sin \alpha = (k - \frac{1}{2}) \times \lambda.$$

4. L'expression précédente peut s'écrire :

$$d \times \frac{r}{d_{\text{Terre-étoile}}} = (k - \frac{1}{2}) \times \lambda$$

$$\text{soit } d = \frac{d_{\text{Terre-étoile}}}{r} \times (k - \frac{1}{2}) \times \lambda$$

Pour que la distance soit minimale, on prend $k = 1$. On en déduit la distance minimale d entre les deux télescopes : $d = \frac{1}{2} \times \frac{d_{\text{Terre-étoile}}}{r} \times \lambda$.

Il vient :

$$d = \frac{1}{2} \times \frac{230 \times 9,461 \times 10^{15} \text{ m}}{55 \times 1,496 \times 10^{11} \text{ m}} \times 10 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Il faut une distance minimale $d = 1,3$ m entre les deux télescopes.

27 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. Calculons l'interfrange : $i = \frac{\lambda_0 \times D}{b}$.

$$i = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m} \times 1,50 \text{ m}}{0,20 \times 10^{-3} \text{ m}} = 4,9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

On a : $\frac{\lambda}{i} = \frac{10 \times 10^{-2} \text{ m}}{4,9 \times 10^{-3} \text{ m}} \approx 20,5$.

Le nombre maximal de franges brillantes sur l'écran est 20.

QCM

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

3 L'effet photoélectrique est le phénomène d'éjection d'électrons d'un métal sous l'effet de radiations lumineuses.

Schéma : voir p. 132.

5 1. Des électrons sont arrachés au zinc métallique, ce qui entraîne un déficit de charges négatives et donc un excès de charges positives.

2. 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 :

λ (nm)	$\mathcal{E}_{\text{photon}}$ (J)
330	$6,03 \times 10^{-19}$
400	$4,97 \times 10^{-19}$

3. 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.

7 1. $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{C \text{ max}}$

2. $\mathcal{E}_{C \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$
 $\mathcal{E}_{C \text{ max}} = (5,03 \text{ eV} - 4,67 \text{ eV}) \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1}$
 d'où : $\mathcal{E}_{C \text{ max}} = 5,76 \times 10^{-20} \text{ J}$

9 1. La puissance électrique disponible diminue lorsque l'éclairement décroît.

2. $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$ avec $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \times S$.

3. La surface du panneau est $S = 1,1 \text{ m}^2$.

D'après le graphique on a donc :

\mathcal{P}_{lum} (W)	$\mathcal{P}_{\text{élec max}}$ (W)
1100	100
660	60
220	20

Dans tous ces cas, $\eta_{\text{max}} = 9\%$. Ce rendement ne dépend pas de l'éclairement.

11 - 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.

13 1. a. On relève graphiquement la valeur de la fréquence seuil à partir de laquelle un électron est expulsé : $\nu_s \approx 8,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

On en déduit la longueur d'onde seuil $\lambda_s = \frac{c}{\nu_s}$

$$\text{Donc } \lambda_s = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}{8,8 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 3,4 \times 10^{-7} \text{ m}$$

soit environ 340 nm.

b. C'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.

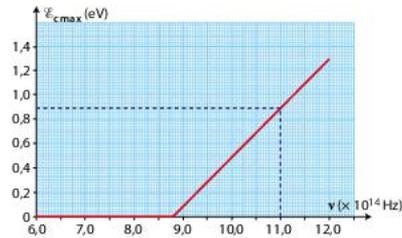
2. On a $\mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ (J)} = h \text{ (J}\cdot\text{s)} \times \nu \text{ (Hz = s}^{-1})$

et $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{C \text{ max}}$ avec $W_{\text{extraction}} = h \times \nu_s$
 Donc $\mathcal{E}_{C \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - h \times \nu_s = h \times \nu - h \times \nu_s$
 $= h \times (\nu - \nu_s)$

$$\mathcal{E}_{C \text{ max}} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \times (1,1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} - 8,8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}) = 1,5 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Soit : $\mathcal{E}_{C \text{ max}} = 0,91 \text{ eV}$.

3. Graphiquement, on recherche l'énergie correspondant à une fréquence égale à $1,1 \times 10^{15}$ Hz.



Graphiquement, on relève : $\mathcal{E}_{C\max} = 0,9$ eV. Cette valeur est en accord avec la précédente.

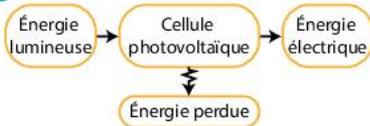
14 1. Les différentes puissances mises en jeu s'écrivent : $\mathcal{P}_{\text{elec}} = 305$ W
 $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \cdot S$ où S est la surface totale de toutes les cellules :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times (160 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \times 60 = 1,54 \times 10^3 \text{ W}.$$

$$2. \eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}.$$

$$3. \eta_{\text{max}} = \frac{305 \text{ W}}{1,54 \times 10^3 \text{ W}} = 0,200, \text{ soit } 20,0 \text{ \%.}$$

21 1.



2. a. On relève, pour un éclairement de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, une puissance maximale de 180 W.

b. La tension de fonctionnement est alors proche de 24 V.

c. On a alors : $I = \frac{P}{U}$.

$$\text{Soit } I = \frac{180 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 7,5 \text{ A}.$$

3. Le rendement est $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$.

La puissance lumineuse reçue par le panneau est proportionnelle à la puissance lumineuse surfacique et à la surface :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \cdot S = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 1318 \times 10^{-3} \text{ m} \times 994 \times 10^{-3} \text{ m} = 1,31 \times 10^3 \text{ W}.$$

La puissance électrique maximale a été déterminée précédemment : $\mathcal{P}_{\text{elec}} = 180$ W

$$\text{Donc le rendement maximal est } \eta = \frac{180}{1,31 \times 10^3}$$

$$\eta = 0,137 \text{ ou } 13,7 \text{ \%.}$$

4. a. Lorsque l'éclairement est $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, la puissance électrique maximale d'un panneau est égale à 180 W.

$$\text{Dans ces conditions, pour produire } 3,5 \text{ kW il faut } \frac{3,5 \times 10^3}{180} = 19,4 \text{ panneaux soit } 20 \text{ panneaux.}$$

b. L'énergie lumineuse par unité de surface reçue à Lyon cumulée sur une année est égale à $1450 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$.

Avec 20 panneaux, l'énergie lumineuse reçue sera :

$$\mathcal{E}_{\text{lum}} = 1450 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \times 1318 \times 10^{-3} \text{ m} \times 994 \times 10^{-3} \text{ m} \times 20 = 3,80 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}.$$

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 étant 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 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. Lorsque la longueur d'onde est $\lambda_2 = 700$ nm, l'énergie de ces photons n'est 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. Pour un électron proche de la surface, la conservation de l'énergie impose :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{C\max}$$

L'énergie cinétique maximale de l'électron est alors $\mathcal{E}_{C\max} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$

$$\text{On a } W_{\text{extraction}} = 2,29 \text{ eV} = 3,66 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Donc } \mathcal{E}_{C\max} = 4,97 \times 10^{-19} \text{ J} - 3,66 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,31 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{De plus, } \mathcal{E}_{C\max} = \frac{1}{2} m_e \times v_{\text{max}}^2$$

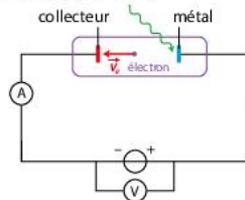
La valeur de la vitesse maximale d'un électron est donc :

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \mathcal{E}_{C\max}}{m_e}}$$

$$\text{soit } v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,31 \times 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

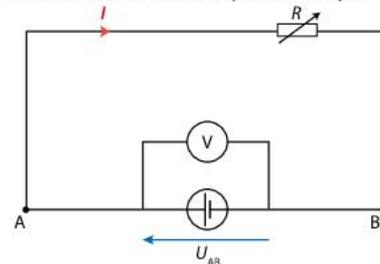
$$v_{\text{max}} = 5,36 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5.

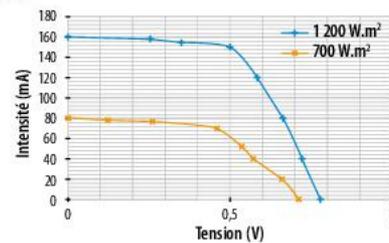


23 Partie I

1. La flèche de la tension U_{AB} est orientée de B vers A, l'ampèremètre est branché en série dans le circuit, enfin, le voltmètre est branché en dérivation de la cellule photovoltaïque.



2.



3. a. La puissance électrique se calcule par :

$$\mathcal{P}_{\text{elec}} = U \cdot I.$$

Exemple : éclairement de $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $U_{AB} = 0,66$ V et $I = 20$ mA, $\mathcal{P}_{\text{elec}} = 0,66 \text{ V} \times 20 \times 10^{-3} \text{ A}$

$$\mathcal{P}_{\text{elec}} = 1,32 \times 10^{-2} \text{ W} = 13,2 \text{ mW}.$$

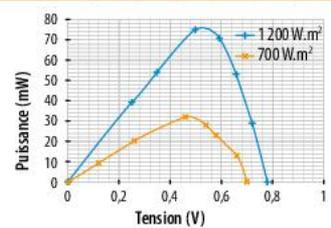
Cas 1 : éclairement de $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

U_{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} (mW)	0	13,2	23,2	28,1	32,2	20,2	9,3	0

Cas 2 : éclairement de $1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

U_{AB} (V)	0,78	0,72	0,66	0,59	0,50	0,35	0,25	0
I (mA)	0	40	80	120	150	155	158	160
\mathcal{P} (mW)	0	28,9	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 : $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \cdot S$ où E est l'éclairement et S la surface du capteur.

$$\text{Ici } S = 0,042 \text{ m} \times 0,042 \text{ m}$$

$$S = 1,76 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Pour $E = 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,23 \text{ W} \text{ et on lit graphiquement}$$

$$\mathcal{P}_{\text{elec max}} = 33 \text{ mW} \text{ donc } \eta = \frac{0,033 \text{ W}}{1,23 \text{ W}} = 0,027$$

soit 2,7 %.

$$\text{De même, pour } E = 1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}, \eta = \frac{0,076 \text{ W}}{2,12 \text{ W}} = 0,036 \text{ soit } 3,6 \text{ \%}$$

b. La tension correspondant au rendement maximal est obtenue par lecture graphique :

$$\text{pour } E = 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} : U = 0,48 \text{ V}$$

$$\text{et pour } E = 1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} : U = 0,53 \text{ V}.$$

c. On calcule l'intensité par $I = \frac{P}{U}$:

$$\bullet \text{ pour } 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} : I = 69 \text{ mA};$$

$$\bullet \text{ pour } 1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} : I = 143 \text{ mA. On peut aussi reporter les tensions sur le premier graphique et y lire l'intensité.}$$

Partie II

• Association série

– La tension aux bornes de l'association est égale à la somme des tensions aux bornes de chaque dipôle. Donc $U = 30 \times U_{\text{cell max}}$, soit : $U = 30 \times 0,52 = 15,6$ V.

– L'intensité du courant qui traverse chaque dipôle est identique, soit ici : $I = 112$ mA.

– La puissance sera 30 fois plus grande que la puissance obtenue pour une seule cellule, $\mathcal{P}_{\text{elec}} = 1,75$ W.

• Association dérivation

– Chaque module est soumis à la même tension $U = 0,52$ V.

– L'intensité du courant, elle, est la somme des intensités des courants délivrés par chaque module : $I = 30 \times I_{\text{cell max}}$ soit $I = 3,36$ A.

– La puissance sera ici aussi 30 fois plus grande, $\mathcal{P}_{\text{elec}} = 1,75$ W.

Conclusion A priori les rendements sont les mêmes. Mais les pertes par effet Joule ne seront pas les mêmes et dépendent notamment des caractéristiques (intensité, tension) de l'appareil disposé en aval (un régulateur en général).

Absorption ou émission de photons	133	Interférences constructives	114
Accélération normale	13	Interférences destructives	115
Accélération tangentielle	13	Interfrange	115
Angle caractéristique de diffraction	113	Kepler (lois de)	49
Atténuation géométrique	96	Logarithme décimal	95
Atténuation par absorption	96	Loi des aires	49
Bilan énergétique de l'effet photoélectrique	132	Loi des orbites	49
Capacité thermique massique	63	Loi des périodes	49
Cellule photoélectrique	133	Modèle particulaire	132
Centre de masse	13	Mouvement circulaire uniforme	13
Champ de gravitation newtonien	48	Mouvement circulaire varié	13
Champ de pesanteur terrestre	30	Mouvement rectiligne uniforme	12
Champ électrique uniforme	30	Mouvement rectiligne uniformément varié	12
Champ vectoriel uniforme	30	Newton (deuxième loi de)	13
Coefficient d'échange convectif	79	Newton (loi de)	78
Condition d'interférences constructives et destructives	114	Niveau d'intensité sonore	95
Conditions initiales	31	Orbite géostationnaire	46
Conduction thermique	78	Orbite polaire	46
Constante d'intégration	31	Période de révolution	49
Convection thermique	78	Phénomène d'interférences	114
Coordonnées cartésiennes	11	Phénomène de diffraction	113
Décalage Doppler	96	Plan équatorial terrestre	46
Différence de distances parcourues	115	Premier principe de la thermodynamique	63
Effet Doppler	96	Primitive par rapport au temps	31
Effet Doppler et vitesse d'un véhicule	94	Rayonnement thermique	78
Effet Doppler-Fizeau	97	Référentiel galiléen	13
Effet photoélectrique	131	Référentiel géocentrique	13
Ellipse	49	Référentiel héliocentrique	13
Électron libre	132	Référentiel terrestre	13
Énergie cinétique	33	Rendement d'une cellule photovoltaïque	133
Énergie cinétique maximale	132	Repère de Frenet	12
Énergie d'un photon	131	Résistance thermique	78
Énergie interne	62	Satellite artificiel	46
Énergie mécanique	33	Satellite géostationnaire	48
Énergie potentielle	33	Signe du décalage Doppler	96
Énergie totale d'un système	62	Sources ponctuelles en phase	114
Équation de la trajectoire	33	Transfert thermique	62
Flux thermique	78	Travail	62
Force de gravitation	48	Travail d'extraction	132
Foyers d'une ellipse	49	Vecteur accélération	12
Franges brillantes	115	Vecteur position	11
Franges sombres	115	Vecteur vitesse	11
Grand axe d'une ellipse	49		
Inclinaison d'une orbite	46		
Intensité sonore	95		
Intensité sonore de référence	95		

Crédits photographiques

Couverture : Tammy 616 / Getty Images ; Pascal Kiszon / Getty Images ; David H. Carrière / Getty Images ;

7 : Gerain0812* ; 8 : MICHEL HANS ; 9 : alexfan32* ; AB ; 10 : Shahjehan* ; 15 : ATTILA Barsan* ; 19 : Bernd Rohrschneider / AGE ; 20 : HAMILTON / REA ; RED BULL CONTENT POOL / SIPA ; 21 : Leonid Andronov* ; S-F* ; 23 : AB ; 25 : Will Russell / GETTY IMAGES ASIAPAC / Getty Images / AFP ; 26 : kudla* ; 27 : Bjoern Wylezich* ; 28 : Guy Bettencourt / Studios Fotonum ; 29 : Cedric POULMAIRE / REA ; 35 : Simonkr / istockphoto ; 36 : ©andyparant.com ; 39 : REUTERS / Andrew Boyers ; 41 : Will Russell / GETTY IMAGES ASIAPAC / Getty Images / AFP ; 42 : REUTERS / Russell Cheyne ; 44 : Westend61 / Getty ; 45 : ©ESA / NASA ; 46 : ©ESA / NASA ; CNES / D.Ducros / Novapix / Leemage ; ESA / P.Carril / Novapix / Leemage ; 47 : Science Photo Library / Lodriguss, Jerry ; 50 : Elena11* ; CNES / D.Ducros / Novapix / Leemage ; Science Photo Library / Garlick, Mark ; 52 : Science Photo Library / EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY ; 54 : P.Carril / Novapix / Leemage ; Science Photo Library / Van Ravenswaay, Detlev ; Don Dixon / Novapix / Leemage ; 55 : CNES / Oliver SATTLER, 2017 ; Science Photo Library / Garlick, Mark ; 56 : ©2019 ESA-CNES-ARIANESPACE / Optique Vidéo du CSG-JM Guillon ; 58 : Siberian Art* ; 59 : Photo12 / Alamy/Hufton+Crow-VIEW ; 60 : Petr Malyshev* ; AB ; 61 : S.Borisov* ; AB ; 62 : Sordalab ; 63 : Eskay Lim / EyeEm / Getty ; 65 : Thomas JCliger / AGE ; Kutlayev Dmitry* ; PHOTO12 / ALAMY ; 67 : chiakto* ; 68 : Kotomiti Okuma* ; Vadim Sadovski* ; Egoitz Bengoetxea Iguaran / AGE Fotostock ; 69 : Lukas Gojda* ; Melissa Castillo / EyeEm / Getty ; tribalmark* ; 70 : bitt24* ; Photo12 / Alamy / Hufton+Crow-VIEW ; Photo12 / Alamy / Steven Sanders ; 71 : AlexLMX / Getty ; Photo12 / Alamy / stockphoto-graf ; 72 : Gamma-Rapho via Getty Images ; Sebastien ORTOLA / REA ; 75 : Vova Shevchuk* ; 76 : Science Photo Library / Landmann, Patrick ; AB ; 77 : iStock / Getty Images Plus ; AB ; 81 : Getty Images Sport / AFP ; 82 : Guy Bouyrie ; 84 : Neirfy* ; 85 : MShev* ; Tatiana Foxy* ; 87 : Vova Shevchuk* ; everst* ; 88 : Brizmaker* ; BK_graphic* ; phatpisit thanatherdivivat* ; 89 : onzon* ; 90 : Ozgur Coskun* ; 91 : Ev. Safronov* ; 92 : Tatiana Popova* ; 93 : Alamy / Photo12 ; JRJfin* ; ©NoisePlanet ; AB ; 94 : Ev. Safronov* ; AB ; 95 : Stephane AUDRAS / REA ; 97 : Richard DAMORET / REA ; 98 : Christophe Lehenauff / Photononstop ; Olesia Bilkei* ; 101 : Mile Atanasov* ; 102 : DELTAPLUS® ; DELTAPLUS® ; 103 : Baptiste FENOUIL / REA ; 104 : Third of november* ; Lukasek* ; 106 : ricochet64* ; 109 : Henk Bogaard / iStock / Getty Images Plus ; 110 : Photo12 / Alamy / Christian Kober 1 ; AB ; 111 : Science Photo Library / Public Health England ; 112 : AB ; AB ; 113 : Photo12 / Alamy / Christian Kober 1 ; AB ; AB ; 114 : AB ; 115 : AB ; 116 : AB ; AB ; AB ; 117 : AB ; AB ; AB ; Photo12 / Alamy / Esa Hiltula ; 119 : AB ; 120 : AB ; AB ; PHOTOPQR / LA DEPECHE DU MIDI / EMILIE CAYRE ; ALB ; AB ; 122 : AB ; AB ; AB ; 124 : AB ; AB ; Henk Bogaard / iStock / Getty Images Plus ; AB ; AB ; 125 : AB ; AB ; AB ; AB ; AB ; 126 : AB ; 127 : Soonthorn Wongsaita* ; 129 : akg-images / TT News Agency / SVT ; 130 : Ian HANNING / REA ; AB ; 131 : Selva / Leemage ; 132 : Everett / Bridgeman images ; 133 : VioNetta* ; 25krunya* ; 134 : Heintje Joseph T. Lee* ; VioNetta* ; Photo12 / Alamy / Mikael Karlsson ; Krasowit* ; 135 : NIKCOA* ; 136 : LuYago* ; 137 : Diyana Dimitrova* ; 138 : Everett / Bridgeman images ; Science Photo Library ; 139 : Science Photo Library / ANTONIO ROMERO ; Photo12 / Alamy / David J. Green ; Roman Borodae* ; Michael Dechev* ; 140 : VDB Photos* ; 142 : SpiritProd33* ; pixinoo* ; 143 : Diyana Dimitrova* ; 144 : neijia* ; 145 : Nagy-Bagoly Arpad* ; 146 : nattapon supawan* .

Photographies d'expériences : Alain Béguerie (AB)

*/Shutterstock

Édition : Fanny Morquin

Assistantes d'édition : Coralie Delvigne, Thaïs Rick

Maquette de couverture : Guylaine Moi

Maquette intérieure : Anne-Danielle Naname

Composition : Soft Office

Iconographie : Michèle Kerneis, Candice Renault

Photographies d'expériences : Alain Béguerie

Schémas : Lionel Buchet, Jean-Luc Maniouloux, Christophe Michel - Domino, Loan Nguyen Thanh Lan

Illustrations : Hubert Blatz

Fabrication : Miren Zapirain, Victor Grimaldi

Principales grandeurs et relations utilisées en physique

Grandeur et symbole	Unité et symbole
longueur (l)	mètre (m)
temps (t)	seconde (s)
masse (m)	kilogramme (kg) ou gramme (g)
volume (V)	mètre cube (m ³) ou litre (L)
valeur d'une vitesse (v)	mètre par seconde (m·s ⁻¹)
valeur d'une accélération (a)	mètre par seconde au carré (m·s ⁻²)
puissance (\mathcal{P})	watt (W) ou kilowatt (kW)
énergie (\mathcal{E})	joule (J) ou kilowattheure (kW·h)
fréquence (f)	hertz (Hz)
période (T)	seconde (s)
valeur d'une force (F)	newton (N)
valeur d'un champ électrique (E)	newton par coulomb (N·C ⁻¹)
pression (P)	pascal (Pa) ou bar (bar)
température (T ou θ)	kelvin (K) ou degré Celsius (°C)
tension (U)	volt (V)
intensité du courant (I)	ampère (A)
résistance (R)	ohm (Ω)
charge électrique (q)	coulomb (C)
masse volumique (ρ)	kilogramme par mètre cube (kg·m ⁻³) ou gramme par millilitre (g·mL ⁻¹)
capacité électrique (C)	farad (F)

En rouge, les unités du système international (unités S.I.).

En bleu, les unités généralement utilisées au laboratoire.

Force de gravitation exercée sur un corps B de masse m_B par un corps A de masse m_A

$$\vec{F}_{A/B} = -G \times \frac{m_A \times m_B}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}$$

valeur en N kg vecteur unitaire
N·m⁻²·kg⁻² m

Force électrique exercée sur un corps B de charge q_B placé dans un champ \vec{E}

$$\vec{F} = q_B \vec{E}$$

valeur en N C valeur en N·C⁻¹

Deuxième loi de Newton

$$\Sigma \vec{F} = m \vec{a}$$

valeur en N kg valeur en m·s⁻²

Premier principe de la thermodynamique

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$$

Variation d'énergie interne d'un système incompressible de capacité thermique massique c .

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (T_f - T_i)$$

J kg J·kg⁻¹·°C⁻¹ ou J·kg·K⁻¹ °C
K

Flux Φ ou puissance \mathcal{P}_{th} thermique

$$\Phi = \mathcal{P}_{th} = \frac{Q}{\Delta t}$$

W J s

Résistance thermique

$$R_{th} = \frac{\Phi}{\theta_A - \theta_B}$$

$$R_{th} = \frac{\Phi}{T_A - T_B}$$

W·°C⁻¹ W °C
W·K⁻¹ W K

Vecteur accélération dans le repère de Frenet

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

m·s⁻¹ vecteur unitaire tangentiel
m vecteur unitaire normal s

Décalage Doppler

$$\Delta f = f_R - f_E$$

Hz Hz Hz

Niveau d'intensité sonore

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

dB W·m⁻²

Angle θ caractéristique de diffraction

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

sans unité m

Angle caractéristique de diffraction dans le cas des ondes lumineuses et pour une ouverture circulaire de diamètre d

$$\theta = 1,22 \times \frac{\lambda}{d}$$

rad m

Énergie d'un photon

$$\mathcal{E}_{photon} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

J J·s Hz J·s m·s⁻¹ m

Rendement d'une cellule photovoltaïque

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{elec}}{\mathcal{P}_{lum}} = \frac{\mathcal{E}_{elec}}{\mathcal{E}_{lum}}$$

sans unité W J

Constantes fondamentales

Grandeur	Symbole	Valeur approchée
Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air	c	3,00 × 10 ⁸ m·s ⁻¹
Constante de Planck	h	6,63 × 10 ⁻³⁴ J·s
Constante universelle de gravitation	G	6,67 × 10 ⁻¹¹ N·m ² ·kg ⁻²
Charge élémentaire	e	1,60 × 10 ⁻¹⁹ C
Masse d'un électron	m_e	9,11 × 10 ⁻³¹ kg
Masse d'un nucléon (proton ou neutron)	m_n	1,67 × 10 ⁻²⁷ kg

Puissances de 10

10 ⁿ	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹²	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10	10 ²	10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²	10 ¹⁵
Abréviation	f	p	n	μ	m	c	d	da	h	k	M	G	T	P
Préfixe	femto	pico	nano	micro	milli	centi	déci	déca	hecto	kilo	méga	giga	téra	péta



Sciences physiques

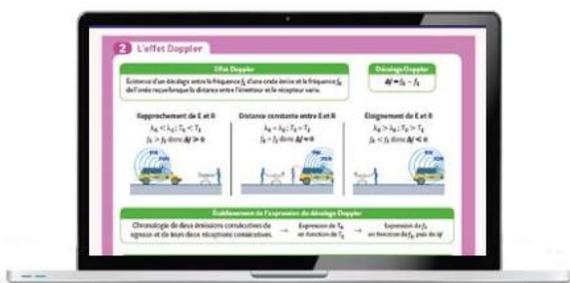
Spécialité SI

Un manuel de Sciences physiques pour acquérir les compétences nécessaires à la spécialité SI

ACCÈS LIBRE :

Mon manuel toujours accessible en ligne sur mesmanuels.fr/4606265

LE MANUEL NUMÉRIQUE PREMIUM



Fini les sacs trop lourds !

Avec :

- Des vidéos de cours avec quiz, pour mieux comprendre et réviser
- Des QCM interactifs pour s'auto-évaluer

→ En vente sur <https://kiosque-edu.com/familles>

RESSOURCES EN +

Les ressources numériques du manuel en accès direct



Avec les QR-codes dans le manuel



Sur le site collection

→ lycee.hachette-education.com/physique-si/tle

41 3010 3
ISBN 978-2-01-786624-4



9 782017 866244



Dans la même collection

hachette
ÉDUCATION

www.hachette-education.com