

Physique Chimie



GUIDE PÉDAGOGIQUE

PROGRAMME 2020 • Collection Bellier • Calafell • Lescure

Sous la direction de

Jean-Philippe BELLIER
Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Julien CALAFELL
Lycée Thiers à Marseille

Nicolas LESCURE
Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Nathalie BARDE
Lycée Saint-Charles à Marseille

Jean-Paul CASTRO
Lycée Stéphane-Hessel à Toulouse

Michel BARDE
Lycée Marcel-Pagnol à Marseille

Maryline DAÏNI-D'INCAN
Lycée Maurice-Janetti
à Saint-Maximin-la-Sainte-Baume

Thierry BAUDOIN
Lycée Victor-Louis à Talence

Éric DAÏNI
Lycée Paul-Cézanne à Aix-en-Provence

Sylvie BERTIN
Lycée de Borda à Dax

Stéphanie BIGORRE
Lycée Alfred-Kastler à Talence

Thierry DULAUANS
Lycée Fernand-Daguin à Mérignac

Marc BIGORRE
Lycée des Graves à Gradignan

Laurence HILAIRE
Lycée Raoul-Dautry à Limoges

Patrice BOUDEY
Lycée de la mer à Gujan-Mestras

Saverio CALLEA
Lycée Gay-Lussac à Limoges

Cyrille LÉMONIE
Lycée Saint-Exupéry
à Terrasson-Lavilledieu

JOËL CARRASCO
Lycée Marcel-Pagnol à Marseille

Bruno POUDENS
Lycée des Graves à Gradignan

AVERTISSEMENT

Vous venez de télécharger gratuitement le fichier pédagogique du Manuel Physique-Chimie T^{le}, édition 2020.

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

Deux raisons principales :

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

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

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

Maquette intérieure : Soft Office

Composition : Soft Office

Schémas : Soft Office

Édition : Nathalie Legros

www.hachette-education.com

© Hachette Livre 2020

58, rue Jean Bleuzen – 92178 Vanves Cedex

hachette
ÉDUCATION

Sommaire



Constitution et transformations de la matière

| | | |
|----|---|-----|
| 1 | Transformations acide-base..... | 5 |
| 2 | Méthodes physiques d'analyse | 13 |
| 3 | Méthodes chimiques d'analyse | 21 |
| 4 | Modélisation macroscopique de l'évolution d'un système | 37 |
| 5 | Modélisation microscopique de l'évolution d'un système | 53 |
| 6 | Évolution d'un système, siège d'une transformation nucléaire .. | 61 |
| 7 | Sens d'évolution spontanée d'un système chimique..... | 69 |
| 8 | Force des acides et des bases..... | 81 |
| 9 | Forcer l'évolution d'un système | 93 |
| 10 | Synthèses organiques | 103 |
| | Exercices Synthèse | 113 |



Mouvement et interactions

| | | |
|----|--|-----|
| 11 | Mouvement et deuxième loi de Newton | 115 |
| 12 | Mouvement dans un champ uniforme | 127 |
| 13 | Mouvement dans un champ de gravitation | 143 |
| 14 | Modélisation de l'écoulement d'un fluide | 153 |
| | Exercices Synthèse | 164 |



L'énergie : conversions et transferts

| | | |
|----|---|-----|
| 15 | Premier principe de la thermodynamique et bilan énergétique | 165 |
| 16 | Transferts thermiques | 177 |
| | Exercices Synthèse | 188 |



Ondes et signaux

| | | |
|----|---------------------------------------|-----|
| 17 | Sons et effet Doppler | 189 |
| 18 | Diffraction et interférences..... | 199 |
| 19 | Lunette astronomique..... | 209 |
| 20 | La lumière : un flux de photons | 217 |
| 21 | Dynamique du dipôle RC..... | 227 |
| | Exercices Synthèse | 238 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| Pages Bac : exercices et ECE | 239 |
|------------------------------------|-----|

1

Transformations acide-base

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 1. Déterminer la composition d'un système par des méthodes physiques et chimiques | |
|---|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| A) Modéliser des transformations acide-base par des transferts d'ion hydrogène H⁺ | |
| Transformation modélisée par des transferts d'ion hydrogène H ⁺ : acide et base de Brønsted, couple acide-base, réaction acide-base. | Identifier, à partir d'observations ou de données expérimentales, un transfert d'ion hydrogène, les couples acide-base mis en jeu et établir l'équation d'une réaction acide-base. |
| Couples acide-base de l'eau, de l'acide carbonique, d'acides carboxyliques, d'amines. | Représenter le schéma de Lewis et la formule semi-développée d'un acide carboxylique, d'un ion carboxylate, d'une amine et d'un ion ammonium. |
| Espèce amphotère. | Identifier le caractère amphotère d'une espèce chimique. |
| B) Analyser un système chimique par des méthodes physiques | |
| pH et relation $\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ}\right)$ avec $c^\circ = 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, concentration standard. | Déterminer, à partir de la valeur de la concentration en ion oxonium H ₃ O ⁺ , la valeur du pH de la solution et inversement. <i>Mesurer le pH de solutions d'acide chlorhydrique (H₃O⁺, Cl⁻) obtenues par dilutions successives d'un facteur 10 pour tester la relation entre le pH et la concentration en ion oxonium H₃O⁺ apporté.</i> Capacité mathématique : Utiliser la fonction logarithme décimal et sa réciproque. |
| 3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique | |
| B) Comparer la force des acides et des bases | |
| Solutions courantes d'acides et de bases. | Citer des solutions aqueuses d'acides et de bases courantes et les formules des espèces dissoutes associées : acide chlorhydrique ((H ₃ O ⁺ (aq), Cl ⁻ (aq)), acide nitrique (H ₃ O ⁺ (aq), NO ₃ ⁻ (aq)), acide éthanóique (CH ₃ COOH (aq)), soude ou hydroxyde de sodium ((Na ⁺ (aq) + HO ⁻ (aq)), ammoniac (NH ₃ (aq)). |

Liens avec les programmes officiels du cycle 4, de seconde et de première

| | Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|----------------------|--|---|---------------------|
| COLLÈGE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Espèce chimique. Corps pur, mélange. Solution. | <ul style="list-style-type: none"> Mesure du pH. Identifier le caractère acide ou basique d'une solution par mesure de pH. Réactions entre solutions acides et basiques. | |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> Molécules. Atomes. Ions. | Identifier la présence d'ions H ⁺ et OH ⁻ . | |
| SECONDE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Espèce chimique. Solvant, soluté. Concentration en masse. La mole. Quantités de matière. Transformation chimique. Réaction chimique. Équation. Espèce spectatrice. | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer la quantité de matière (en mol) d'une espèce dans un échantillon. Établir l'équation de réaction associée et l'ajuster. | |

| | | | |
|-----------------|--|--|-------------------|
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Espèces moléculaires/ ioniques. • Schéma de Lewis, doublets liants, non-liants. • Entités chimiques : molécules, atomes, ions. | Décrire et exploiter le schéma de Lewis d'une molécule. | |
| PREMIÈRE | | | |
| Macroscopique | Concentration en quantité de matière. | Déterminer la quantité de matière d'un soluté à partir de sa concentration et du volume de solution. | $C = \frac{n}{V}$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Schéma de Lewis. • Géométrie des molécules. • Formules brutes et formules semi-développées. | <ul style="list-style-type: none"> • Établir le schéma de Lewis de molécules et d'ions. • Interpréter la géométrie d'une entité à partir de son schéma de Lewis. | |

Vu en première

Transformations acide-base

p. 14

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo : Schéma de Lewis

- S_1 est acide car $\text{pH} < 7$; S_2 est basique car $\text{pH} > 9$.
- S_2 contient plus d'ions HO^- que d'ions H^+ car elle est basique.
- Le schéma de Lewis s'explique par la structure électronique des éléments :
 - l'oxygène O : $1s^2 2s^2 2p^4$; il possède 2 doublets non liants et 2 électrons célibataires ;
 - l'hydrogène H : $1s^1$; il possède un électron célibataire.
 Le schéma de Lewis de la molécule possède donc une liaison O–H formée par deux électrons célibataires issus de chaque atome. Aux

deux doublets non liants, viendra s'ajouter un troisième doublet non liant car l'oxygène est chargé (il possède un électron de plus que ses électrons de valence). L'ion hydroxyde porte donc une charge négative car il est entouré de 7 électrons au lieu des 6 électrons de valence.

- L'eau, neutre, a un $\text{pH} = 7$. Donc le pH augmente lors d'un ajout d'eau dans une solution acide de $\text{pH} = 3$.

Flash test

1. A ; 2. A ; 3. A ; 4. A, B et C.

Activité 1

expérimentale Mesures de pH

p. 15

Capacités exigibles

- Déterminer, à partir de la valeur de la concentration en ion oxonium, la valeur du pH de la solution, et inversement.
- Mesurer le pH de solutions d'acide chlorhydrique.
- Réaliser des dilutions successives d'un facteur 10.
- Tester la relation entre le pH et la concentration en ion oxonium H_3O^+ apporté.
- Utiliser la fonction logarithme décimal et sa réciproque.

Matériel et produits disponibles :

- Pipettes jaugées de 5,0, 10,0 et 25,0 mL, Poire à pipetter.
- Huit fioles jaugée de 50,0 mL avec bouchon.
- Huit béchers de 50 mL.
- Pissette d'eau distillée, gants et lunettes.
- pH -mètre ; tableur grapheur.
- Solution S_0 d'acide chlorhydrique de concentration $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Pratique expérimentale

- a. La solution initiale S_0 est telle que : $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
 - Protocole pour la préparation de la solution S_{n+1} : à l'aide d'une pipette jaugée, prélever 5,0 mL de la solution S_n . Verser cette solution dans une fiole jaugée de 50,0 mL. Compléter à moitié avec de l'eau distillée. Boucher et agiter. Finir de compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. Bouger et agiter.

La dilution est d'un facteur 10, car :

$$F = \frac{V_{\text{mère}}}{V_{\text{filles}}} = \frac{50}{5} = 10.$$

- Protocole pour la mesure du pH : au préalable, la sonde est étalonnée en utilisant des solutions étalons. Rincer la sonde de pH avec de l'eau distillée. Sécher. Plonger la sonde dans la solution. Attendre quelques secondes que la valeur se stabilise avant de relever la valeur du pH . Après chaque mesure, rincer et sécher.
- b. Mise en œuvre du protocole, résultats :

| | S_0 | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4 | 5 | 5,8 | 6,3 | 6,3 |

- a. Concentration de la solution S_{n+1} obtenue par dilution d'un facteur 10 de la solution S_n :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{n+1} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_n}{10} \text{ et } [\text{H}_3\text{O}^+]_0 = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

| | S_0 | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 |
|--|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{calculée}}$ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) | 1,0 | $1,0 \times 10^{-1}$ | $1,0 \times 10^{-2}$ | $1,0 \times 10^{-3}$ | $1,0 \times 10^{-4}$ |

| | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{calculée}}$ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) | $1,0 \times 10^{-5}$ | $1,0 \times 10^{-6}$ | $1,0 \times 10^{-7}$ | $1,0 \times 10^{-8}$ |

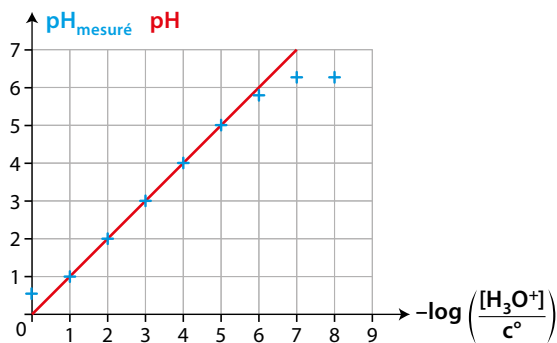
b.

| | S ₀ | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|--|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| [H ₃ O ⁺] _{calculée} (mol · L ⁻¹) | 1,0 | 1,0 × 10 ⁻¹ | 1,0 × 10 ⁻² | 1,0 × 10 ⁻³ | 1,0 × 10 ⁻⁴ |
| pH _{calculé} = -log $\left(\frac{[H_3O^+]_{calculée}}{c^o}\right)$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| [H ₃ O ⁺] _{calculée} (mol · L ⁻¹) | 1,0 × 10 ⁻⁵ | 1,0 × 10 ⁻⁶ | 1,0 × 10 ⁻⁷ | 1,0 × 10 ⁻⁸ |
| pH _{calculé} = -log $\left(\frac{[H_3O^+]_{calculée}}{c^o}\right)$ | 5 | 6 | 7 | 8 |

La courbe $pH = f\left(-\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^o}\right)\right)$ attendue est une droite passant par zéro : **courbe rouge**.

sant par zéro : **courbe rouge**.



3

| | S ₀ | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|--|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| [H ₃ O ⁺] _{calculée} (mol · L ⁻¹) | 1,0 | 1,0 × 10 ⁻¹ | 1,0 × 10 ⁻² | 1,0 × 10 ⁻³ | 1,0 × 10 ⁻⁴ |
| -log $\left(\frac{[H_3O^+]}{c^o}\right)$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| pH _{mesuré} | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 |

| | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| [H ₃ O ⁺] _{calculée} (mol · L ⁻¹) | 1,0 × 10 ⁻⁵ | 1,0 × 10 ⁻⁶ | 1,0 × 10 ⁻⁷ | 1,0 × 10 ⁻⁸ |
| -log $\left(\frac{[H_3O^+]}{c^o}\right)$ | 5 | 6 | 7 | 8 |
| pH _{mesuré} | 5 | 5,8 | 6,3 | 6,3 |

La **courbe bleue** est obtenue en traçant les valeurs de pH mesuré en fonction de $-\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^o}\right)$, [H₃O⁺] étant la concentration en ions oxonium apportés par la solution acide.

On observe deux écarts de la courbe bleue vis-à-vis de la courbe rouge qui constitue la courbe modèle :

– pour de faibles valeurs de pH : la relation $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^o}\right)$

n'est pas valable, ce qui est cohérent avec le texte du doc. **A** qui indique que la relation n'est valable que pour des solutions diluées ;
– pour des valeurs de pH > 6 : la relation n'est pas valable pour des solutions dont la concentration en ions oxonium est inférieure ou égale à 10⁻⁶ mol · L⁻¹ car, pour de telles concentrations en acide apporté, il faut tenir compte des concentrations en ions oxonium déjà présents dans l'eau, ce qui augmente la concentration réelle en ions oxonium et donc diminue le pH.

Un pas vers le cours

4 La relation $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^o}\right)$ n'est valable que pour des

solutions diluées ($[H_3O^+] < 0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

Remarque : pour des solutions de faibles concentrations en acide apporté, la relation est valable, mais la concentration en ions oxonium doit tenir compte, non seulement des ions oxonium apportés par l'acide mais également des ions oxonium présents dans l'eau initialement, avant introduction de l'acide.

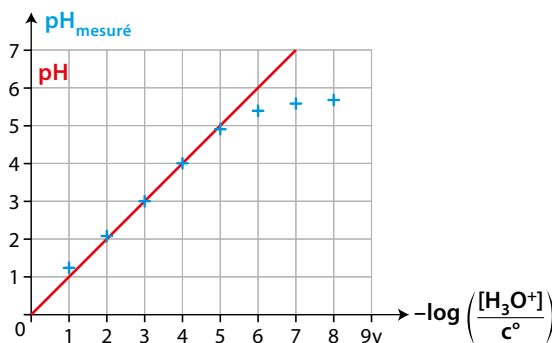
Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

L'eau doit être idéalement distillée car l'eau déminéralisée contient encore des molécules organiques non chargées. De plus, l'eau devra être fraîchement préparée afin de limiter la dissolution de dioxyde de carbone qui acidifie la solution et en modifie le pH.

[H₃O⁺] représente ici en réalité la concentration en ions oxonium théoriquement présents si on ne tient compte que des ions oxonium apportés par l'acide. Autrement dit, [H₃O⁺] représente la concentration en acide apporté C. Cette notion n'ayant pas été introduite jusqu'à présent, le choix a été fait de ne pas en parler à ce stade du chapitre. Les résultats obtenus avec de l'eau déminéralisée sont :

| | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| [H ₃ O ⁺] _{calculée} (mol · L ⁻¹) | 1,0 × 10 ⁻¹ | 1,0 × 10 ⁻² | 1,0 × 10 ⁻³ | 1,0 × 10 ⁻⁴ |
| pH _{mesuré} | 1,2 | 2,1 | 3,0 | 4,0 |

| | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| [H ₃ O ⁺] _{calculée} (mol · L ⁻¹) | 1,0 × 10 ⁻⁵ | 1,0 × 10 ⁻⁶ | 1,0 × 10 ⁻⁷ | 1,0 × 10 ⁻⁸ |
| pH _{mesuré} | 5,3 | 5,4 | 5,5 | 5,6 |



Capsule vidéo de cours : Les acides et les bases

QCM

1. B et C ; 2. B ; 3. A et B ; 4. B et C ; 5. C ; 6. B ; 7. A ; 8. B ; 9. A ; 10. A ; 11. B ; 12. A.

4 Identifier un transfert d'ion hydrogène

1. Un acide est une espèce chimique capable de céder au moins un ion hydrogène H^+ . Une base est une espèce chimique capable de capter au moins un ion hydrogène H^+ .

2. $CH_3CO_2H(aq) / CH_3CO_2^-(aq)$; $CO_2, H_2O(aq) / HCO_3^-(aq)$; $NH_4^+(aq) / NH_3(aq)$; $H_3O^+(aq) / H_2O(l)$; $H_2O(l) / HO^-(aq)$.

3. $CH_3CO_2H(aq) \rightleftharpoons CH_3CO_2^-(aq) + H^+$

$CO_2, H_2O(aq) \rightleftharpoons HCO_3^-(aq) + H^+$

$NH_4^+(aq) \rightleftharpoons NH_3(aq) + H^+$

$H_3O^+(aq) \rightleftharpoons H_2O(l) + H^+$

$H_2O(l) \rightleftharpoons H^+ + HO^-(aq)$

4. L'eau appartient à deux couples jouant tantôt le rôle d'un acide, tantôt d'une base. C'est une espèce amphotère.

5. Schéma de Lewis : $CH_3 - \overset{\overset{O}{\parallel}}{C} - \overset{\ominus}{O} - [H]$;

Formule semi-développée : $CH_3 - \overset{\overset{O}{\parallel}}{C} - O - [H]$

5 Identifier des couples acide-base

1. $NH_4^+(aq) / NH_3(aq)$, $HCO_2H(aq) / HCO_2^-(aq)$ sont les seuls couples acide-base car l'acide et la base ne diffèrent que d'un ion hydrogène H^+ .

2. Les demi-équations sont :

$NH_4^+(aq) \rightleftharpoons NH_3(aq) + H^+$

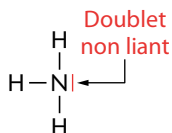
$HCO_2H(aq) \rightleftharpoons H^+ + HCO_2^-(aq)$

3. a. Une espèce amphotère peut se comporter comme un acide ou comme une base.

b. Les deux couples sont : $H_2SO_4(aq) / HSO_4^-(aq)$;

$HSO_4^-(aq) / SO_4^{2-}(aq)$

4. Le doublet non liant de l'azote est un site donneur de doublet d'électrons permettant de se lier à l'ion hydrogène :



6 Établir l'équation d'une réaction acide-base

1. La formule chimique de l'acide éthanóïque est : CH_3CO_2H .

2. Les couples sont : $CH_3CO_2H(aq) / CH_3CO_2^-(aq)$ et $CO_2, H_2O(aq) / HCO_3^-(aq)$.

3. $CH_3CO_2H(aq) + HCO_3^-(aq) \rightleftharpoons CH_3CO_2^-(aq) + CO_2, H_2O(aq)$

4. L'effervescence est due à la présence de dioxyde de carbone gazeux.

7 Exploiter l'équation d'une réaction acide-base

1. L'éthylamine est une base car elle capte un ion hydrogène pour donner l'acide conjugué.

2. $C_2H_5NH_3^+(aq) / C_2H_5NH_2(aq)$ et $H_3O^+(aq) / H_2O(l)$

3. $C_2H_5NH_3^+(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons C_2H_5NH_2(aq) + H_3O^+(aq)$

8 Calculer le pH d'une solution

1. $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^0}\right)$, soit $pH = -\log\left(\frac{3,2 \times 10^{-7}}{1}\right)$;

donc $pH = 6,5$.

$pH < 7,2$, donc l'eau de la piscine ne respecte pas la préconisation et peut être irritante.

2. • Pour un $pH = 7,2$, $[H_3O^+] = c^0 \times 10^{-pH}$;

soit $[H_3O^+] = 1 \times 10^{-7,2}$;

donc $[H_3O^+] = 6,3 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

• Pour un $pH = 7,4$, $[H_3O^+] = c^0 \times 10^{-pH}$;

soit $[H_3O^+] = 1 \times 10^{-7,4}$;

donc $[H_3O^+] = 4,0 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

• Donc l'eau de la piscine respectera la préconisation si :

$4,0 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} < [H_3O^+] < 6,3 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. La concentration en ions oxonium est trop élevée. Il faut rajouter une espèce basique pour augmenter le pH.

9 Déterminer une concentration en ions oxonium

1. Pour un $pH = 5$, la concentration des ions oxonium est $[H_3O^+] = 1,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

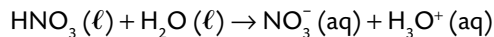
L'eau sera acide si $[H_3O^+] < 1,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

2. $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^0}\right)$ soit $pH = -\log\left(\frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{1}\right)$,

donc $pH = 5,8 > 5,0$, donc cette eau de pluie n'est pas considérée comme acide alors qu'elle l'est pourtant !

10 Il en voit de toutes les couleurs

1. L'équation de la réaction est :



2. La solution S est verte. Cette couleur résulte d'une superposition du bleu et du jaune. Le pH est donc compris entre 3,0 et 4,6.

• Pour un $pH = 3,0$, $[H_3O^+] = c^0 \times 10^{-pH} = 1 \times 1,0 \times 10^{-3}$ donc $[H_3O^+] = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

• Pour un $pH = 4,6$, $[H_3O^+] = c^0 \times 10^{-pH} = 1 \times 10^{-4,6}$ donc $[H_3O^+] = 2,5 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

• Donc l'encadrement de la concentration en ions oxonium de la solution S est :

$2,5 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} < [H_3O^+] < 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. La solution S deviendra jaune si le pH baisse. Il faut donc ajouter de l'acide à cette solution.

4. a. $H_3O^+(aq) + HO^-(aq) \rightarrow 2 H_2O(l)$

b. Les ions sodium $Na^+(aq)$ n'est pas un acide ou une base selon Brønsted. Ce sont donc des ions spectateurs.

c. L'ion hydroxyde est une base. L'ajout d'ion hydroxyde permettra d'augmenter le pH et donc de colorer la solution en bleu.

11 Côté maths

Utiliser la fonction logarithme décimal

1. $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^0}\right) = -\log\left(\frac{5,0 \times 10^{-3}}{1}\right)$ donc $pH = 2,3$.

2. $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^0}\right) = -\log\left(\frac{1,5}{1}\right)$ donc $pH = -0,2$, ce qui est

impossible en solution aqueuse. En effet, la relation n'est valable que pour $[H_3O^+] < 0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

12 Les coraux face à l'acidification des océans

1. $CO_2, H_2O(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons HCO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$

2. La réaction entre le dioxyde de carbone et l'eau produit des ions oxonium responsables de l'acidification des océans.

3. $pH_{\text{actuel}} = pH_0 - 0,10$ car $8,05 = 8,15 - 0,10$,

donc $-\log[H_3O^+]_{\text{actuel}} = -\log[H_3O^+]_0 - 0,10$,

soit $\log[H_3O^+]_{\text{actuel}} - \log[H_3O^+]_0 = 0,10$;

$\log\left(\frac{[H_3O^+]_{\text{actuel}}}{[H_3O^+]_0}\right) = 0,10$ donc $\frac{[H_3O^+]_{\text{actuel}}}{[H_3O^+]_0} = 10^{0,10}$

soit $\frac{[H_3O^+]_{\text{actuelle}}}{[H_3O^+]_0} = 1,3$.

$$\text{Enfin, } [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{actuel}} = 1,3 [\text{H}_3\text{O}^+]_0 = [\text{H}_3\text{O}^+]_0 + \frac{30}{100} [\text{H}_3\text{O}^+]_0,$$

ce qui signifie que la concentration en ions oxonium a augmenté de 30 % depuis le début de l'ère industrielle.

4. Le carbonate de calcium présent dans les coraux réagit avec les ions oxonium présents dans l'eau du fait de la présence de dioxyde de carbone produit par les activités humaines.

13 À chacun son rythme

Préparation d'une solution d'acide chlorhydrique

1. $\text{HCl}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$

2. Dans un bidon de 1,0 L, la masse totale de la solution est :

$$m(\text{totale}) = \rho \times V = 1,11 \times 1,0 \times 10^3 = 1,1 \times 10^3 \text{ g.}$$

La masse de HCl (g) dissout est donc :

$$m(\text{HCl}) = \frac{23}{100} \times 1,1 \times 10^3 = 2,5 \times 10^2 \text{ g.}$$

3. La quantité de matière de HCl dissout est :

$$n(\text{HCl}) = \frac{m(\text{HCl})}{M(\text{HCl})}; \text{ soit } n(\text{HCl}) = \frac{2,5 \times 10^2}{(35,5 + 1,0)} = 6,8 \text{ mol.}$$

D'après l'équation de la question 1 : $n(\text{HCl}_{\text{dissout}}) = n(\text{H}_3\text{O}^+)$ donc $n(\text{H}_3\text{O}^+) = 6,8 \text{ mol.}$

La concentration en quantité de matière d'ions oxonium $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ contenue dans un bidon de 1,0 L est :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{com}} = \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)}{V} \text{ soit } [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{com}} = \frac{6,8}{1,0};$$

$$\text{donc } [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{com}} = 6,8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. Le facteur de dilution est $F = \frac{100}{30}$. La concentration obtenue sera donc :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{diluée}} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{com}}}{F}.$$

$$\text{Donc } [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{diluée}} = \frac{6,8}{\frac{100}{30}} = 2,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

5. La solution S contient :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_S = c^\circ \times 10^{-\text{pH}} = c^\circ \times 10^{-1,7} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

6. $[\text{H}_3\text{O}^+]_S < [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{diluée}}$. La solution S est trop diluée et ne peut pas convenir.

14 Nettoyer à l'ammoniaque

1. Verrerie : une fiole jaugée, une pipette jaugée, un bécher, une propipette, une pissette, de l'eau distillée, un bouchon.

Éléments de protection : blouse, lunette, gants.

2. a. $\text{NH}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{NH}_4^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$

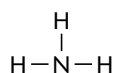
b. Les couples mis en jeu : $\text{NH}_4^+(\text{aq}) / \text{NH}_3(\text{aq})$ et $\text{H}_2\text{O}(\ell) / \text{HO}^-(\text{aq})$.

3. $\text{pH} > 7$ donc la solution est basique.

4. $[\text{H}_3\text{O}^+] = c^\circ \times 10^{-\text{pH}}$ donc $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1 \times 10^{-10,5}$

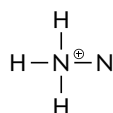
soit $[\text{H}_3\text{O}^+] = 3,2 \times 10^{-11} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

5. Schéma de Lewis :



Le doublet d'électrons non liants de l'atome d'azote est propice à la formation d'une liaison avec l'ion hydrogène H^+ , c'est donc une base.

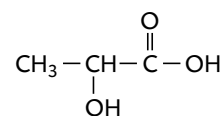
6. Schéma de Lewis :



L'atome d'azote dans l'ion ammonium est entouré de quatre liaisons. Il n'y a donc plus d'électrons de valence disponibles pour former une cinquième liaison. L'ion ammonium ne peut donc pas être une base et ne peut donc pas être une espèce amphotère.

15 Détartre une machine à laver

1. La formule semi-développée est :



2. $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$

3. La quantité de matière initiale d'acide lactique est :

$$n(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = \frac{m}{M} \text{ donc } n(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = \frac{54,1}{90,0};$$

soit $n(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 6,0 \times 10^{-1} \text{ mol.}$

| Équation de la réaction | | $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightarrow \text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ | | | |
|-------------------------|------------------|--|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| État du système | Avancement (mol) | Quantités de matière (mol) | | | |
| | | $n(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)$ | $n(\text{H}_2\text{O})$ | $n(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-)$ | $n(\text{H}_3\text{O}^+)$ |
| État initial | $x = 0$ | $6,0 \times 10^{-1}$ | solvant | 0 | 0 |
| État intermédiaire | x | $6,0 \times 10^{-1} - x$ | solvant | x | x |
| État final | $x = x_f$ | $6,0 \times 10^{-1} - x_f$ | solvant | x_f | x_f |

4. Si la réaction est totale, il ne reste plus d'acide lactique dans la solution en fin de réaction, donc :

$$x_f = x_{\text{max}} \text{ et } 6,0 \times 10^{-1} - x_{\text{max}} = 0, \text{ soit } x_{\text{max}} = 6,0 \times 10^{-1} \text{ mol.}$$

5. Par conséquent, si elle est totale, $[\text{H}_3\text{O}^+] = x_{\text{max}} = 6,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Le pH de la solution obtenu étant de 1,9, sa concentration en ions oxonium est donc de :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-1,9} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$1,2 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} < 6,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

La concentration réelle en ions oxonium est plus faible que celle attendue si la transformation était totale. La transformation n'est donc pas totale.

16 Résolution de problème

Contrôler la qualité de l'eau d'un aquarium

1^{re} étape : Bien comprendre la question posée

- Quel est le rôle du carbonate de calcium ?
- Comment se comporte le carbonate de calcium dans l'eau ?
- Comment réagissent les ions hydrogénocarbonate avec les ions oxonium ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

- Le pH de l'eau d'un aquarium doit être compris entre 5,5 et 8,5.
- Le volume de l'aquarium est de 120 L.
- L'eau de l'aquarium a un pH de 4,5.
- La dissolution du carbonate de calcium est totale et produit des ions calcium et des ions carbonate.
- Les ions carbonate réagissent avec les ions oxonium selon une transformation totale.

3^e étape : Dégager la problématique

Déterminer la masse de carbonate de calcium à introduire afin d'ajuster le pH de l'eau de l'aquarium à une valeur de 5,5.

4^e étape : Construire la réponse

- Calculer la quantité d'ions oxonium présents dans l'eau de l'aquarium.
- Calculer la quantité d'ions oxonium présents dans une eau d'aquarium de pH égal à 5,5.
- En déduire la quantité d'ions oxonium devant réagir pour augmenter le pH jusqu'à la valeur souhaitée.
- Déterminer la relation stœchiométrique liant les quantités d'ions oxonium et d'ions carbonate à partir de l'équation donnée.
- En déduire la quantité d'ions carbonate nécessaire.

- Déterminer la relation stœchiométrique liant les quantités d'ions carbonate et de carbonate de calcium à partir de l'équation donnée.
- En déduire la quantité puis la masse de carbonate de calcium nécessaires.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

Pour connaître la quantité de carbonate de calcium à introduire, il est nécessaire de déterminer la quantité d'ions oxonium devant régir pour atteindre le pH de 5,5.

- Mettre en forme la réponse.

- Calculer la quantité d'ions oxonium présents dans l'eau de l'aquarium de pH égal à 4,5.

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{4,5} = c^\circ \times 10^{-\text{pH}} \text{ soit } [\text{H}_3\text{O}^+]_{4,5} = 1 \times 10^{-4,5},$$

$$\text{donc } [\text{H}_3\text{O}^+]_{4,5} = 3,2 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1},$$

ce qui représente une quantité de matière de

$$n(\text{H}_3\text{O}^+)_{4,5} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{4,5} \times V, \text{ soit :}$$

$$n(\text{H}_3\text{O}^+)_{4,5} = 3,2 \times 10^{-5} \times 120 = 3,8 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

- Calculer la quantité d'ions oxonium présents dans une eau d'aquarium de pH égal à 5,5.

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{5,5} = c^\circ \times 10^{-\text{pH}},$$

$$\text{soit } [\text{H}_3\text{O}^+]_{5,5} = 1 \times 10^{-5,5},$$

$$\text{donc } [\text{H}_3\text{O}^+]_{5,5} = 3,2 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1},$$

ce qui représente une quantité de matière de

$$n(\text{H}_3\text{O}^+)_{5,5} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{5,5} \times V, \text{ soit :}$$

$$n(\text{H}_3\text{O}^+)_{5,5} = 3,2 \times 10^{-6} \times 120 = 3,8 \times 10^{-4} \text{ mol.}$$

- En déduire la quantité d'ions oxonium devant réagir pour augmenter le pH.

La quantité de matière d'ions oxonium devant réagir :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+)_r = n(\text{H}_3\text{O}^+)_{4,5} - n(\text{H}_3\text{O}^+)_{5,5}$$

$$\text{soit } n(\text{H}_3\text{O}^+)_r = 3,8 \times 10^{-3} - 3,8 \times 10^{-4} = 3,4 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

- Déterminer la relation stœchiométrique liant les quantités d'ions oxonium et d'ions carbonate à partir de l'équation donnée. D'après la stœchiométrie de la réaction :

$$\frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)_r}{2} = \frac{n(\text{CO}_3^{2-})}{1}.$$

- En déduire la quantité d'ions carbonate nécessaire.

$$n(\text{CO}_3^{2-}) = \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)_r}{2} \text{ donc } n(\text{CO}_3^{2-}) = \frac{3,4 \times 10^{-3}}{2},$$

$$\text{soit } n(\text{CO}_3^{2-}) = 1,7 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

- Déterminer la relation stœchiométrique liant les quantités d'ions carbonate et de carbonate de calcium à partir de l'équation donnée.

$$\frac{n(\text{CO}_3^{2-})}{1} = \frac{n(\text{CaCO}_3)}{1}.$$

- En déduire la quantité puis la masse de carbonate de calcium nécessaire.

La quantité de carbonate de calcium nécessaire est donc

$$n(\text{CaCO}_3) = n(\text{CO}_3^{2-}) = 1,7 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

$$\text{Or } m(\text{CaCO}_3) = n(\text{CaCO}_3) \times M(\text{CaCO}_3),$$

$$\text{donc } m(\text{CaCO}_3) = 1,7 \times 10^{-3} \times 100,1 = 0,17 \text{ g.}$$

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

0,17 g de bâtons de craie sont nécessaires pour corriger le pH ce qui semble une valeur acceptable.

17 Discuter un modèle

1. Le pH doit être donné avec une seule décimale.

2. a. Pour une solution aqueuse diluée, $[\text{H}_3\text{O}^+] < 0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, le pH est défini par :

$$\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ}\right) \text{ avec pH sans unité, } [\text{H}_3\text{O}^+] \text{ en } \text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ et}$$

$$c^\circ = 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

b.

| | | | |
|---|------|------|------|
| $[\text{H}_3\text{O}^+] \text{ (mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}$ | 0,10 | 0,50 | 1,0 |
| $\text{pH}_{\text{mesuré}}$ | 1,13 | 0,42 | 0,16 |
| $\text{pH}_{\text{calculé}} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ}\right)$ | 1 | 0,3 | 0 |

3. Ces solutions sont trop fortement concentrées ($[\text{H}_3\text{O}^+] > 0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) pour pouvoir appliquer la définition

$$\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ}\right).$$

4. H_3O^+ (aq), Cl^- (aq) et H_2O (l).

5. Ce sont des ions spectateurs qui n'ont aucun caractère acide ou basique.

6. Pour une concentration des solutions en ions oxonium telle que $[\text{H}_3\text{O}^+] < 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, on ne peut plus négliger les ions oxoniums présents déjà dans l'eau. Le pH est donc plus acide que celui attendu car, aux ions oxonium apportés par l'acide chlorhydrique, s'ajoutent ceux présents dans l'eau.

18 Acide-base versus oxydoréduction

1. Les réactions acide-base sont des réactions liées au transfert d'ions hydrogène, alors que les réactions d'oxydoréduction sont des réactions liées au transfert d'électrons.

2. H_3O^+ (aq), Cl^- (aq) et H_2O (l).

$$3. \text{pH}_{S_1} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ}\right),$$

$$\text{soit } \text{pH}_{S_1} = -\log\left(\frac{5,0 \times 10^{-2}}{1}\right) \text{ donc } \text{pH}_{S_1} = 1,3.$$

4. Première hypothèse possible : On ajoute des ions oxonium à la solution S_1 . On peut s'attendre donc à une diminution du pH.

Deuxième hypothèse possible : La solution S_2 est moins concentrée en ions oxonium et, de ce fait, le pH du mélange augmentera.

5. • Calcul de la quantité de matière d'ions oxonium présents dans le mélange :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = n_{S_1}(\text{H}_3\text{O}^+) + n_{S_2}(\text{H}_3\text{O}^+),$$

$$\text{soit } n(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+]_1 \times V_{S_1} + [\text{H}_3\text{O}^+]_2 \times V_{S_2}. \text{ Donc :}$$

$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = 5,0 \times 10^{-2} \times 50,0 \times 10^{-3} + 2,5 \times 10^{-2} \times 50,0 \times 10^{-3}.$$

$$\text{Soit } n(\text{H}_3\text{O}^+) = 3,8 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

- Calcul de la concentration en ions oxonium dans le mélange :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)}{V_{S_1} + V_{S_2}}$$

$$\text{donc } [\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{3,8 \times 10^{-3}}{100,0 \times 10^{-3}} = 3,8 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\text{Soit } \text{pH}_{\text{mélange}} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ}\right)$$

$$\text{soit } \text{pH}_{\text{mélange}} = -\log\left(\frac{3,8 \times 10^{-2}}{1}\right)$$

$$\text{donc } \text{pH}_{\text{mélange}} = 1,4.$$

Première hypothèse possible : Contrairement à notre hypothèse, le pH a augmenté. Le pH dépend de la concentration donc non seulement de la quantité de matière en ions oxonium mais également du volume d'eau. Cette hypothèse était fautive.

Deuxième hypothèse possible : Ce pH confirme l'hypothèse faite au départ.

6. a. $\text{Fe}(\text{s}) + 2 \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

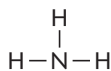
- b. Les ions oxonium sont consommés au cours de cette réaction. Leur concentration va donc diminuer et le pH ne pourra donc qu'augmenter.

Préparation à l'écrit

19 L'uréase dans le milieu stomacal

1. H_3O^+ (aq), Cl^- (aq) et H_2O (l).
 $[\text{H}_3\text{O}^+] = c^0 \times 10^{-\text{pH}}$ donc $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1 \times 10^{-2,0}$,
 soit $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

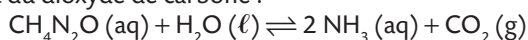
2. a. Pour l'ammoniac, schéma de Lewis :



et formule semi-développée : NH_3 .

b. Le doublet d'électrons non liants de l'atome d'azote est propice à la formation d'une liaison avec l'ion hydrogène H^+ , c'est donc une base : NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq).

c. L'urée $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ réagit avec l'eau pour former de l'ammoniac NH_3 et du dioxyde de carbone :



d. $\text{NH}_3 (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) \rightarrow \text{NH}_4^+ (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell)$

3. L'ammoniac réagit avec les ions oxonium, donc sa sécrétion permet de diminuer la concentration en ions oxonium autour de la bactérie. Le pH est ainsi moins acide autour de la bactérie qui peut donc survivre.

4. D'après le graphique, l'activité enzymatique de l'uréase à $\text{pH} = 2$ est nulle. Or la bactérie parvient à survivre dans un tel milieu. Il est donc nécessaire d'envisager d'autres entités chimiques associées.

20 Préparation d'une solution d'acide chlorhydrique

1. L'eau est une espèce amphotère car elle peut se comporter tantôt comme une base, tantôt comme un acide.

2. $\text{HCl} (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\ell) \rightarrow \text{Cl}^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$

3. D'après l'équation de la réaction :

$$n(\text{HCl}_{\text{apportée}}) = n(\text{H}_3\text{O}^+).$$

$$\text{Or } n(\text{HCl}_{\text{apportée}}) = \frac{V_1}{V_m} = \frac{5,0}{24,0} = 0,21 \text{ mol}.$$

Donc $n(\text{H}_3\text{O}^+) = 0,21 \text{ mol}$.

On détermine la concentration en ions oxonium :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)}{V_2} = \frac{0,21}{1,0} = 0,21 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. Après la dilution par 10, la nouvelle concentration en ions oxonium est :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{0,21}{10} = 0,021 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

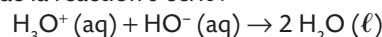
$$\text{soit } \text{pH} = -\log\left(\frac{0,021}{1}\right) \text{ donc } \text{pH} = 1,7.$$

5. • La quantité d'ions oxonium présents dans les 10,0 mL est :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{initial}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{initial}} \times V_s$$

$$\text{soit } n(\text{H}_3\text{O}^+) = 0,21 \times 10 \times 10^{-3} \text{ donc } n(\text{H}_3\text{O}^+) = 2,1 \times 10^{-3} \text{ mol}.$$

• L'équation de la réaction s'écrit :



La solution sera neutre si $\text{pH} = 7$, soit $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,0 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$,

$$\text{soit } n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{final}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{final}} \times V_s$$

$$n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{final}} = 1,0 \times 10^{-7} \times 10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-9} \text{ mol}.$$

• La quantité d'ions hydroxyde à verser est donc :

$$n(\text{HO}^-) = n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{initial}} - n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{final}}$$

$$\text{Soit } n(\text{HO}^-) = 2,1 \times 10^{-3} - 1,0 \times 10^{-9},$$

$$\text{donc } n(\text{HO}^-) = 2,1 \times 10^{-3} \text{ mol}.$$

Le volume à verser est :

$$V = \frac{n(\text{HO}^-)}{[\text{HO}^-]} = \frac{2,1 \times 10^{-3}}{0,10} = 21 \text{ mL}.$$

Préparation à l'ECE

1. Le facteur de dilution est :

$$F = \frac{C}{C_A} = \frac{1 \times 10^{-1}}{1 \times 10^{-2}} = 10.$$

Le volume de la solution à prélever est :

$$V = \frac{V_A}{F} = \frac{50 \times 10^{-3}}{10} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ L} = 5 \text{ mL}.$$

Protocole : Prélever à l'aide d'une pipette jaugée un volume de 5,0 mL de la solution S_0 . Verser dans une fiole de 50 mL. Remplir à moitié d'eau distillée. Boucher et agiter. Compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. Boucher et agiter de nouveau.

2. Pour être propice à la fermentation, la solution de saumure finale doit avoir un $\text{pH} = 5,0$.

La concentration en ions oxonium dans la solution de saumure finale doit être : $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

La quantité d'ions oxonium présents dans la solution de saumure finale est de :

$$n = [\text{H}_3\text{O}^+] \times V_s = 1,0 \times 10^{-5} \times 1,0$$

$$n = 1,0 \times 10^{-5} \text{ mol}.$$

Le volume V de la solution S_A d'acide chlorhydrique à prélever est :

$$V = \frac{n}{C_A} = \frac{1,0 \times 10^{-5}}{1,0 \times 10^{-2}} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ L} = 1,0 \text{ mL}.$$

3. Le pH attendu est donc de 5,0.

Les éventuelles sources d'erreurs expérimentales sont :

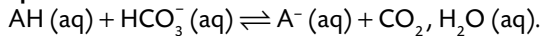
- volume de prélèvement de l'acide ;
- étalonnage du pH-mètre ;
- propreté des instruments, etc.

À deux, c'est mieux

Évaluation orale n° 1 : Santé

Le bicarbonate de sodium contient des ions hydrogénocarbonate, espèce basique comme le montre le **couple Acide/Base** : $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} (\text{aq}) / \text{HCO}_3^- (\text{aq})$.

La **réaction** de cette **base** avec les espèces **acides** $\text{AH} (\text{aq})$ présentes dans notre organisme contribue à l'augmentation du **pH**. L'**équation** s'écrit :



C'est à ce titre que le bicarbonate de sodium est qualifié d'antiacide.

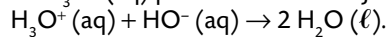
Évaluation orale n° 2 : Environnement

La présence d'**acides** dans les rejets industriels contribue à diminuer le **pH** des eaux de rejets et génère des effets néfastes pour l'équilibre du milieu biologique des cours d'eau.

L'ajout d'hydroxyde de sodium dans les rejets industriels, soigneusement dosé, permet de limiter ces effets néfastes.

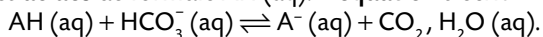
Les ions hydroxyde présents dans l'hydroxyde de sodium est une espèce **basique**.

L'**équation** de la **réaction** entre les ions hydroxyde $\text{HO}^- (\text{aq})$ et les ions oxonium $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$ présents dans les rejets s'écrit :



Les rejets industriels sont ainsi neutralisés.

De même, les ions hydroxyde $\text{HO}^- (\text{aq})$ **réagissent** avec les autres espèces **acides** de formule $\text{AH} (\text{aq})$. L'**équation** s'écrit :



Je m'exprime à l'oral sur

Les transformations acide-base

• Quelle est la définition du pH ?

Pour une solution aqueuse diluée, $[\text{H}_3\text{O}^+] < 0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, le **pH** est défini par :

$$\text{pH} = -\log \left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ} \right)$$

sans unité → en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
 $c^\circ = 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

• Qu'appelle-t-on un acide et une base conjugués ?

Un acide et une base sont dits conjugués si l'on peut passer de l'un à l'autre par transfert d'un ion hydrogène.

• Comment mesurer le pH d'une solution aqueuse ?

Le pH d'une solution peut être mesuré par du papier pH (peu précis) ou par un pH-mètre qui doit être correctement étalonné. Le pH s'exprime avec une seule décimale.

• Comment établit-on une équation de réaction acide-base ?

Tout d'abord, il faut identifier les deux couples mis en jeu au cours de la réaction. Ensuite, il faut écrire les deux demi-équations acide-base en plaçant les réactifs à gauche. Enfin, l'équation de la réaction s'établit en sommant les deux demi-équations afin que les ions hydrogène n'y apparaissent plus.

2

Méthodes physiques d'analyse

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 1. Déterminer la composition d'un système par des méthodes physiques et chimiques | |
|---|--|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| B) Analyser un système chimique par des méthodes physiques | |
| Absorbance ; loi de Beer-Lambert. Conductance, conductivité ; loi de Kohlrausch. | Exploiter la loi de Beer-Lambert, la loi de Kohlrausch ou l'équation d'état du gaz parfait pour déterminer une concentration ou une quantité de matière. Citer les domaines de validité de ces relations. <i>Mesurer une conductance et tracer une courbe d'étalonnage pour déterminer une concentration.</i> |
| Spectroscopie infrarouge et UV-visible. Identification de groupes caractéristiques et d'espèces chimiques. | Exploiter, à partir de données tabulées, un spectre d'absorption infrarouge ou UV-visible pour identifier un groupe caractéristique ou une espèce chimique. |

Liens avec les programmes officiels de seconde et de première

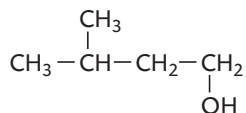
| | Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|----------------------|---|--|---|
| SECONDE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Corps pur, mélange. Solution, soluté, solvant. Masse volumique, densité. | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer une concentration en masse. Réaliser et exploiter une gamme d'étalonnage. | $\rho = \frac{m}{V}$ $t = \frac{m}{V}$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> Entités chimiques : molécules, atomes, ions. | | |
| PREMIÈRE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Volume molaire. Absorbance. Spectres UV-visible et IR. Groupes caractéristiques. | <ul style="list-style-type: none"> Lien entre volume molaire d'un gaz et quantité de matière. Absorbance d'une solution. Mesurer une absorbance. Exploiter un spectre d'absorption infrarouge. Identifier les groupes caractéristiques associés aux familles : alcool, aldéhyde, cétone et acide carboxylique. | $A = k \times C$ |
| Microscopique | | | |
| TERMINALE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Conductance. Conductivité. Conductimètre. Équation d'état du gaz parfait. | <ul style="list-style-type: none"> Exploiter un spectre IR ou UV-Visible. Mesurer une conductance. Exploiter les lois de Beer-Lambert et de Kohlrausch. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait. | $\sigma = k \times C$ $P \times V_{\text{gaz}} = n_{\text{gaz}} \times R \times T$ $V_m = \frac{R \times T}{p}$ |
| Microscopique | Gaz parfait. | | Gaz parfait. |

Réactiver ses connaissances

Capsules vidéos :

- Groupes caractéristiques
- Spectroscopie IR

1. La formule semi-développée du 3-méthylbutan-1-ol est :



2. Le spectre présente une bande d'absorption infrarouge à 3 200-3 400 cm^{-1} caractéristique de la liaison O-H du groupe hydroxyle. Ce spectre peut donc être celui du 3-méthylbutan-1-ol.

Flash test

1. **A, B et C** ; 2. **B et C** ; 3. **A** ; 4. **C**.

Activité 1

expérimentale



Tâche complexe

Dosage par étalonnage conductimétrique

p. 31

Capacités exigibles

- Exploiter la loi de Kohlrausch pour déterminer une concentration.
- Mesurer une conductance et tracer une courbe d'étalonnage pour déterminer une concentration.

Matériel et produits disponibles :

- Deux burettes graduées de 25,0 mL.
- Six tubes à essais sur support avec bouchons.
- Flacon contenant l'eau salée préparée par l'aquariophile.
- Solution mère S_0 de concentration en chlorure de sodium $C_0 = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Pissette d'eau distillée.
- Fiole jaugée de 100,0 mL.
- Pipette jaugée de 10,0 mL.
- Conductimètre avec cellule.
- Tableur-grapheur.

Investigation

1 Des pistes de résolutions peuvent être fournies par le professeur.

Étapes de la démarche de résolution :

1^{re} étape : Lire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter (S'approprier)

1. La concentration en chlorure de sodium de la solution préparée par l'aquariophile doit être égale à $3,0 \pm 0,3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

2. Un conductimètre permet de mesurer la conductivité d'une solution ionique.

- La conductivité d'une solution ionique dépend des ions présents dans la solution et de leurs concentrations.

- La solution étudiée ne contient qu'un seul soluté, le chlorure de sodium.

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique (Analyser)

- La concentration en chlorure de sodium de la solution peut être déterminée en mesurant sa conductivité.
- Les conductivités de solutions étalons peuvent être mesurées afin de réaliser une courbe d'étalonnage.

3^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre (Réaliser)

- Préparer une gamme de solutions étalon de concentrations en masse en chlorure de sodium connues par dilutions de la solution mère S_0 mise à disposition.
- Mesurer la conductivité de chacune de ces solutions.
- Mesurer la conductivité de la solution préparée par l'aquariophile.
- Tracer le graphique $\sigma = f(C)$.
- Déterminer la valeur de la concentration en chlorure de sodium par lecture graphique.

4^e étape : Exploiter les résultats et conclure (Valider)

Si le résultat obtenu appartient à l'encadrement de la valeur de la concentration en chlorure de sodium acceptable pour les poissons, la solution est utilisable par l'aquariophile.

Un pas vers le cours

2 La loi de Kohlrausch s'énonce comme suit : la conductivité d'une solution ionique est proportionnelle à sa concentration en soluté ionique : $\sigma = k \times C$.

Activité 2

documentaire Spectroscopie infrarouge

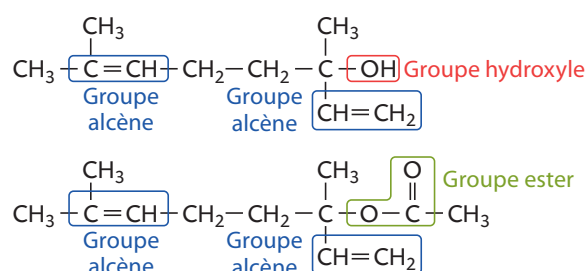
p. 32

Capacité exigible

- Exploiter, à partir de données tabulées, un spectre d'absorption infrarouge pour identifier un groupe caractéristique ou une espèce chimique.

Analyse des documents

1 Formule semi-développée du linalol (1) et formule semi-développée de l'éthanoate de linalyle (2) :



2 Le spectre **a** présente une bande forte et fine à environ 1740 cm^{-1} caractéristique de la liaison C=O du groupe ester ; il peut donc être celui de l'éthanoate de linalyle.

Le spectre **b** présente une bande forte et large à $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ caractéristique de la liaison O-H du groupe hydroxyle ; il peut donc être celui du linalol.

3 L'huile essentielle de lavande aspic se distingue de l'huile essentielle de lavande fine car cette dernière contient de l'éthanoate de linalyle et a un spectre présentant un pic caractéristique du groupe ester. Cependant, parmi les espèces chimiques autres que le linalol que contient la lavande aspic, il est possible qu'il y ait un ou plusieurs esters et donc le spectre de l'huile essentielle

de lavande aspic pourrait présenter aussi un pic caractéristique du groupe ester. Il n'est donc pas possible de distinguer les deux huiles essentielles avec certitude.

Un pas vers le cours

4 Si le spectre infrarouge d'un mélange d'espèces chimiques comporte tous les pics d'absorption correspondant aux groupes caractéristiques d'une espèce chimique, il est possible de supposer que cette espèce chimique est effectivement présente dans le mélange. Mais sans plus d'informations, il est impossible de l'affirmer.

Capsules vidéos de cours :

- Dosages par étalonnage
- Détermination d'une quantité de gaz
- Spectroscopie IR

QCM

p. 37

1. A et C ; 2. A et C ; 3. B et C ; 4. A et C ; 5. A et C ; 6. C ; 7. B et C ; 8. C ; 9. C ; 10. A.

Exercices

Appliquer le cours

p. 40

4 Utiliser la loi de Beer-Lambert

1. Loi de Beer-Lambert : pour une longueur d'onde λ donnée, l'absorbance A d'une solution diluée est proportionnelle à la concentration C en espèce colorée :

$$A_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \times \ell \times C$$

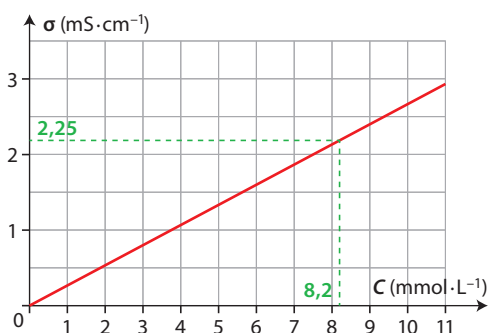
ϵ_{λ} en $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ℓ en cm C en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
 A sans unité

2. Pour une concentration C inférieure à $3\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, le graphe est une droite passant par l'origine ; il traduit donc la loi de Beer-Lambert.

3. On repère le point d'intersection entre le graphe et la droite parallèle à l'axe des abscisses d'ordonnée $A_5 = 1,25$. La valeur de la concentration est l'abscisse de ce point : $C_5 = 2,2\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

5 Exploiter la loi de Kohlrausch

1. Tracé de la courbe d'étalonnage : $\sigma = f(C)$.



2. La courbe traduit la loi de Kohlrausch car le graphe est une droite qui passe par l'origine, donc $\sigma = k \times C$.

3. On repère le point $\sigma_5 = 2,25\text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ sur l'axe des ordonnées. On détermine la valeur de la concentration C_5 sur l'axe des abscisses : $C_5 = 8,2\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Et donc $C_0 = 10 \times C_5$ soit $C_0 = 10 \times 8,2 \times 10^{-3} = 8,2 \times 10^{-1}\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

4. Comme $C_0 > 10^{-2}\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, il a fallu diluer la solution S_0 pour être dans le domaine de linéarité de la loi de Kohlrausch.

6 Écrire l'expression d'une conductivité

$$1. \sigma = \lambda_{\text{Ag}^+} \times [\text{Ag}^+] + \lambda_{\text{NO}_3^-} \times [\text{NO}_3^-].$$

2. σ s'exprime en $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$; λ_{Ag^+} et $\lambda_{\text{NO}_3^-}$ s'expriment en $\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$.

$$\text{Donc } [\text{Ag}^+] \text{ et } [\text{NO}_3^-] \text{ s'expriment en : } \frac{\text{S} \cdot \text{m}^{-1}}{\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}} = \text{mol} \cdot \text{m}^{-3}.$$

7 Exploiter la valeur d'une conductivité

$$1. \sigma = \lambda_{\text{K}^+} \times [\text{K}^+] + \lambda_{\text{Cl}^-} \times [\text{Cl}^-] = (\lambda_{\text{K}^+} + \lambda_{\text{Cl}^-}) \times C$$

$$2. \text{a. } \sigma = 1,04\text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1} = 1,04 \times 10^{-3}\text{ S} \cdot \text{cm}^{-1} = 1,04 \times 10^{-3} \times 10^2\text{ S} \cdot \text{m}^{-1} = 1,04 \times 10^{-1}\text{ S} \cdot \text{m}^{-1}.$$

$$C = \frac{\sigma}{(\lambda_{\text{K}^+} + \lambda_{\text{Cl}^-})} = \frac{1,04 \times 10^{-1}}{(7,35 \times 10^{-3} + 7,63 \times 10^{-3})} = 6,94\text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} = [\text{K}^+].$$

$$\text{b. } C = 6,94 \times 10^{-3}\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

8 Utiliser l'équation d'état du gaz parfait

1. Équation d'état du gaz parfait : $P \times V = n \times R \times T$ avec P en Pa, V en m^3 , n en mol, T en K et $R = 8,314\text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

2. La quantité de diazote N_2 formé est :

$$n(\text{N}_2) = \frac{P \times V}{R \times T}.$$

$$\text{soit } n(\text{N}_2) = \frac{1,3 \times 10^5 \times 90 \times 10^{-3}}{8,314 \times (273 + 30)} = 4,6\text{ mol}.$$

9 Calculer la valeur d'une pression

1. Équation d'état du gaz parfait : $P \times V = n \times R \times T$.

Pour Mars, on peut écrire :

$$P_{\text{Mars}} = \frac{n_{\text{Mars}} \times R \times T}{V}$$

$$\text{donc } P_{\text{Mars}} = \frac{0,36 \times 8,314 \times (273 - 63)}{1,0} = 6,3 \times 10^2\text{ Pa}.$$

2. De la même façon, pour un même volume V d'atmosphère terrestre à la même température T , on peut écrire :

$$P_{\text{Terre}} = \frac{n_{\text{Terre}} \times R \times T}{V} \text{ donc } \frac{P_{\text{Terre}}}{P_{\text{Mars}}} = \frac{n_{\text{Terre}}}{n_{\text{Mars}}} = \frac{58}{0,36} = 1,6 \times 10^2.$$

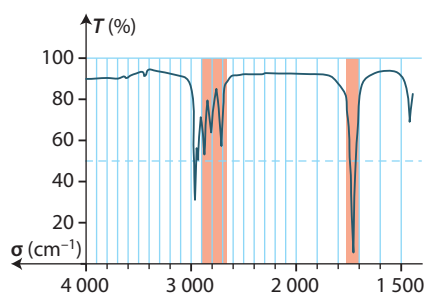
La pression atmosphérique martienne est donc 160 fois plus petite que celle de la Terre.

10 Associer une espèce à un spectre infrarouge

Le spectre infrarouge présente :

- une bande forte et fine vers $1\,720\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{C}=\text{O}$;
- deux bandes moyennes et fines entre $2\,700$ et $2\,900\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{C}-\text{H}_{\text{aldéhyde}}$.

Le composé comporte donc un groupe carbonyle associé à la fonction aldéhyde. Ce spectre IR peut être celui du composé **C** (butanal), seul aldéhyde parmi les trois composés proposés.

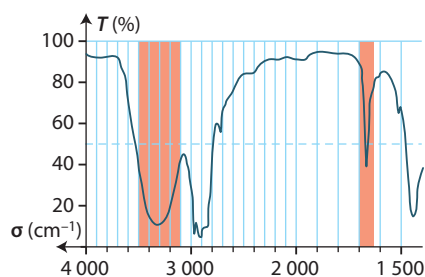


11 Identifier des bandes d'absorption

Le géranjol possède une fonction alcool $\text{O}-\text{H}_{\text{alcool}}$ et deux fonctions alcène $\text{C}=\text{C}$.

Le spectre infrarouge présente une bande associée à chaque fonction :

- une bande forte et large entre vers $3\,200$ et $3\,400\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{O}-\text{H}_{\text{alcool}}$;
- une bande moyenne et fines entre $1\,680\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{C}=\text{C}$.



12 Exploiter un spectre

1. Il s'agit du spectre UV-visible de la propanone.
2. Le spectre présente un maximum d'absorption vers 280 nm dans l'ultraviolet.
3. La propanone est une espèce incolore car elle n'absorbe pas dans le visible.

13 Identifier une espèce à partir d'un spectre

1. Ce spectre est appelé « UV-visible » car les absorbances sont mesurées pour des ondes appartenant aux domaines visibles et UV.
2. Cette solution est colorée car elle absorbe des radiations de longueurs d'onde comprises entre 600 nm et 700 nm qui appartiennent au domaine visible.
3. L'absorbance maximale est à environ 660 nm ; le colorant est donc le bleu de méthylène.

14 À chacun son rythme

Contrôle qualité d'un produit

1. On repère le point $\sigma_5 = 1,8\text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ sur l'axe des ordonnées. On détermine la valeur de la concentration C_5 sur l'axe des abscisses : $C_5 = 14\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} = 1,4 \times 10^{-2}\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

2. La solution S_0 est diluée 10 fois, donc $C_0 = 10 \times C_5$, soit $C_0 = 10 \times 1,4 \times 10^{-2}\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 1,4 \times 10^{-1}\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. Concentration en masse :

$$t_0 = C_0 \times M(\text{NaCl}) \text{ soit } t_0 = 1,4 \times 10^{-1} \times 58,5 = 8,2\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. Le fabricant indique : « $0,85\text{ g}$ de chlorure de sodium pour 100 mL de solution », ce qui correspond à $t_{\text{notice}} = \frac{0,85}{100 \times 10^{-3}} = 8,5\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

5. Écart relatif : $\frac{|t_{\text{notice}} - t_0|}{t_{\text{notice}}} = \frac{|8,5 - 8,19|}{8,19} = 0,0378... \approx 4\%$.

6. La concentration en masse en chlorure de sodium de la solution S_0 satisfait au critère de qualité car l'écart relatif est inférieur à 5 %.

15 Olympic Drug

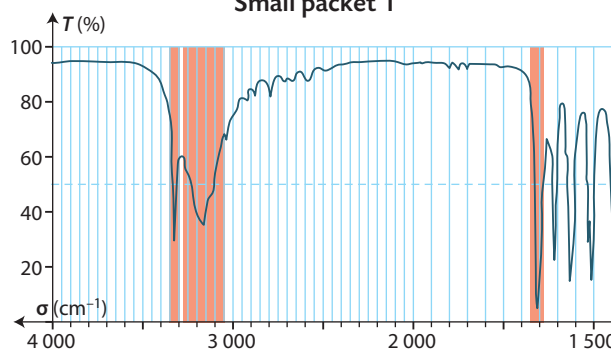
Traduction :

Dans le bureau du médecin d'une équipe sportive, des enquêteurs ont trouvé deux petits paquets contenant des pilules non étiquetées. Ils veulent identifier les principes actifs contenus dans ces pilules. Une analyse est réalisée.

- Vous avez été engagé pour déterminer par spectroscopie infrarouge ce qui est contenu dans chaque pilule.

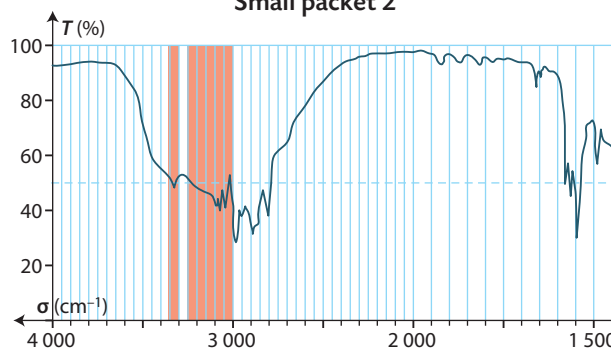
Réponses :

Small packet 1



- Bande forte et fine vers $3\,350\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{N}-\text{H}$.
- Bande forte et large entre $3\,100$ et $3\,300\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{O}-\text{H}$.
- Bande forte et fine vers $1\,650\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{C}=\text{O}$.
- Seul le paracétamol présente les trois liaisons $\text{N}-\text{H}$, $\text{O}-\text{H}$ et $\text{C}=\text{O}$. Le paquet 1 contient du paracétamol.

Small packet 2



- Bande moyenne et fine vers $3\,300\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{N}-\text{H}$.
- Bande forte et large entre $3\,100$ et $3\,300\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{O}-\text{H}$.
- Pas de bande forte et fine vers $1\,650\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison $\text{C}=\text{O}$.
- Le paquet 2 contient de l'éphédrine.

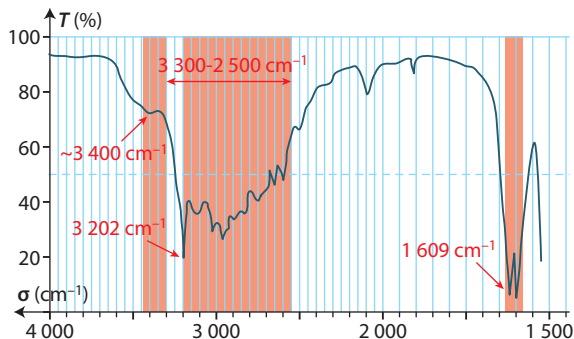
16 Connaître les critères de réussite

La tyrosine

1. Le spectre IR présente :

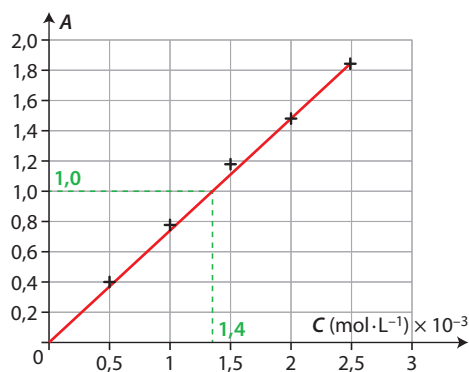
- une bande moyenne vers $3\,400\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison N–H ;
- une bande large et forte entre $2\,600$ et $3\,200\text{ cm}^{-1}$ associée à la liaison O–H_{acide carboxylique} ;
- deux bandes fortes et fines vers $1\,600\text{ cm}^{-1}$ associées à la liaison N–H.

Ce spectre IR peut donc être celui de L-tyrosine.



2. La L-tyrosine n'absorbant pas dans le visible, une solution aqueuse de L-tyrosine est incolore.

3. On trace le graphe $A = f(C)$ puis on trace la droite qui passe par l'origine et qui passe au plus près de tous les points.



On repère le point $A_s = 1,0$ sur l'axe des ordonnées. On détermine alors la valeur de la concentration C_s sur l'axe des abscisses : $C_s = 1,4 \times 10^{-3}\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

La quantité de L-tyrosine dans la solution S (et donc dans une gélule) est $n_s = C_s \times V_s$.

La masse de L-tyrosine dans une gélule est :

$$m_s = n_s \times M(\text{tyrosine}) = C_s \times V_s \times M(\text{tyrosine})$$

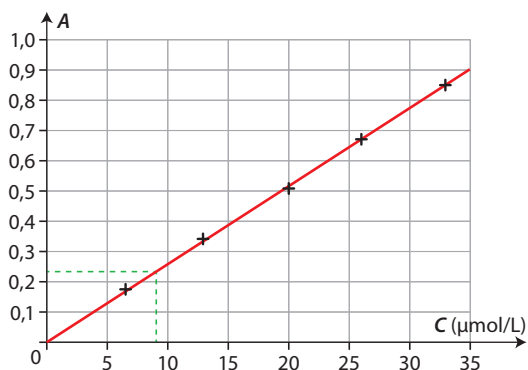
soit $m_s = 1,4 \times 10^{-3} \times 2,00 \times 181,0 = 0,507\text{ g}$ donc $m_s = 507\text{ mg}$.

On retrouve à 1,4 % près la masse 500 mg indiquée sur l'étiquette.

17 Dosage de la vanilline

1. On trace le graphe A en fonction de C .

On trace la droite d'étalonnage qui passe au plus près de tous les points expérimentaux et par l'origine.



Pour $A = 0,241$, on détermine graphiquement la concentration en vanilline : $C = 9,0\text{ micromol} \cdot \text{L}^{-1}$.

La masse de vanilline dans la solution préparée est donc :

$$m = n \times M = C \times V \times M$$

$$m = 9,0 \times 10^{-6} \times 0,5000 \times 152,0$$

$$m = 6,84 \times 10^{-4}\text{ g} \approx 0,7\text{ mg de vanilline pour } 1,0\text{ g de sucre vanillé.}$$

2. 1 g de ce sucre vanillé contient 0,7 mg de vanilline.

Si le sucre vanillé contient 4 % en masse de gousse de vanille, 1 g de ce sucre vanillé contient 0,04 g de gousse de vanille.

Or 1 g de gousse de vanille peut contenir au maximum 25 mg de vanilline. Donc 1 g de ce sucre vanillé pourrait contenir au maximum une masse de vanilline égale à :

$$\frac{0,04 \times 25}{1} = 1\text{ mg} > 0,7\text{ mg.}$$

Ainsi, l'indication de l'étiquette est acceptable.

18 Les phtalates dans les emballages alimentaires

1. La bande vers $1\,500\text{ cm}^{-1}$ est la bande d'absorption des liaisons $C=C_{\text{aromatique}}$ du cycle aromatique du DINP.

La bande vers $1\,700\text{ cm}^{-1}$ est la bande d'absorption de la liaison $C=O_{\text{ester}}$ du DINP.

2. Le dichlorométhane est choisi comme solvant car il n'absorbe pas vers $1\,700\text{ cm}^{-1}$. La présence du dichlorométhane ne perturbera donc pas les résultats de l'analyse.

3. • Prélever un échantillon d'un jouet pour bébé et en déterminer précisément la masse.

• Dissoudre cet échantillon dans un volume connu de dichlorométhane.

• Déterminer la quantité de DINP contenue dans cet échantillon par exemple par étalonnage :

– mesurer les absorbances A à $1\,700\text{ cm}^{-1}$ d'une série de solutions de concentrations C connues en DINP, le solvant de ces solutions étant le dichlorométhane ;

– tracer le graphe $A = f(C)$;

– mesurer l'absorbance à $1\,700\text{ cm}^{-1}$ de la solution obtenue à partir du jouet ;

– utiliser le graphe pour déterminer la concentration de cette solution en DINP ;

– déduire la masse de DINP contenue dans l'échantillon et comparer cette masse à la masse de l'échantillon.

4. On calcule :

$$\frac{m_{\text{DINP}}}{m_{\text{échantillon}}} = \frac{36}{10,0 \times 10^3} = 3,6 \times 10^{-3} = 0,36\%$$

Ce pourcentage massique est supérieur à 0,1 %, le jouet ne peut être mis sur le marché.

19 Résolution de problème

Briquet à gaz

1^{re} étape : S'approprier la consigne ou la question posée

Comparer le volume de gaz consommé lors d'une utilisation du briquet avec le volume total de butane gazeux libérable par le briquet.

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. Le réservoir du briquet est rempli de butane liquide.

2. Quand le briquet est utilisé, le butane s'échappe du réservoir et passe à l'état gazeux.

3. Le volume de butane gazeux dégagé par une utilisation est égal à 20 mL.

3^e étape : Dégager la problématique

Déterminer le volume du réservoir du briquet puis calculer le nombre d'utilisations auquel ce volume correspond.

4^e étape : Construire la réponse

• Calculer le volume du réservoir.

• Déterminer le volume de butane liquide contenu dans le réservoir.

• En déduire le volume de butane gazeux correspondant.

• Comparer ce volume au volume de butane correspondant à une utilisation.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

Une partie du butane liquide contenu dans le réservoir d'un briquet est libérée, sous forme gazeuse, à chaque utilisation. Le volume de gaz correspondant à une utilisation est connu. Il faut donc déterminer le rapport entre le volume total de gaz susceptible d'être libéré par le briquet et le volume d'une utilisation.

- Mettre en forme la réponse.

Le volume du réservoir est :

$$V_{\text{rés}} = 5,0 \times 2,0 \times 1,0 = 10 \text{ cm}^3 = 10 \times 10^{-6} \text{ m}^3.$$

Le réservoir est rempli aux trois-quarts donc le volume de butane liquide est :

$$V_{\text{liq}} = \frac{3}{4} \times 10 \times 10^{-6} = 7,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3.$$

La quantité n_{liq} de butane liquide dans le réservoir :

$$n_{\text{liq}} = \frac{m_{\text{liq}}}{M} = \frac{\rho_{\text{liq}} \times V_{\text{liq}}}{M} = \frac{580 \times 10^3 \times 7,5 \times 10^{-6}}{58,0} = 7,5 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

La quantité de butane liquide dans le réservoir est égale à la quantité de butane gazeuse disponible :

$$n_{\text{gaz}} = n_{\text{liq}} = 7,5 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

En utilisant l'équation d'état du gaz parfait, on a :

$$P \times V_{\text{gaz}} = n_{\text{gaz}} \times R \times T$$

$$\text{soit } V_{\text{gaz}} = \frac{n_{\text{gaz}} \times R \times T}{P} = \frac{7,5 \times 10^{-2} \times 8,314 \times (273 + 20)}{1013 \times 10^2}$$

$$\text{soit } V_{\text{gaz}} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,8 \text{ L}.$$

$$\text{Donc, le rapport des volumes est } \frac{1,8}{20 \times 10^{-3}} = 90.$$

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

Le nombre maximal N_{max} d'utilisations du briquet est donc égal à 90.

20 L'eau oxygénée « 130 volumes »

1. La quantité de matière de dioxygène est :

$$n(\text{O}_2) = \frac{P \times V}{R \times T} = \frac{1,00 \times 10^5 \times 130 \times 10^{-3}}{8,314 \times 273} = 5,73 \text{ mol}.$$

2. $n(\text{H}_2\text{O}_2) = 2 \times n(\text{O}_2) = 2 \times 5,73 = 11,5 \text{ mol}$,
donc $C_0 = 11,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. La masse de peroxyde d'hydrogène contenue dans un litre d'eau oxygénée 130 volumes est :

$$m(\text{H}_2\text{O}_2) = n(\text{H}_2\text{O}_2) \times M(\text{H}_2\text{O}_2) = 11,5 \times 34,0 = 391 \text{ g}.$$

(On obtient $m(\text{H}_2\text{O}_2) = 389 \text{ g}$ si on réutilise les résultats des calculs intermédiaires sans les arrondir.)

Or, un litre d'eau oxygénée 130 volumes a une masse $m_{\text{sol}} = 1,13 \times 10^3 \text{ g}$.

$$\text{Donc, } \frac{m(\text{H}_2\text{O}_2)}{m_{\text{sol}}} = \frac{391}{1,13 \times 10^3} = 0,346 \text{ soit } 34,6 \%, \text{ ce qui est}$$

très proche de l'indication donnée.

(On obtient $\frac{m(\text{H}_2\text{O}_2)}{m_{\text{sol}}} = 0,344$ soit 34,4 % si on réutilise les résultats des calculs intermédiaires sans les arrondir.)

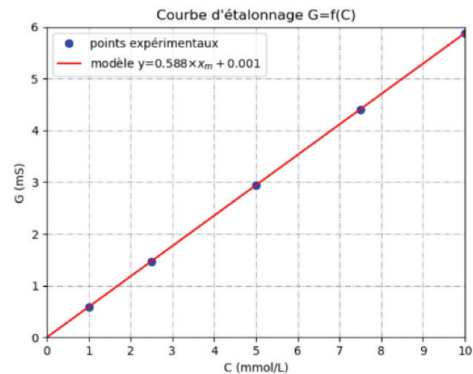
21 Python

Hypocalcémie

1. Lignes 4, 5, 7, 8 et 9 du programme Python complétées.

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 # Données expérimentales
4 x = [10.0, 7.5, 5.0, 2.5, 1.0] # Ci en mmol/L
5 y = [5.88, 4.41, 2.94, 1.47, 0.59] # G en mS
6 # Affichage
7 plt.title("Courbe d'étalonnage G=f(C)")
8 plt.xlabel("C (mmol/L)")
9 plt.ylabel("G (mS)")
```

2. La ligne 11 du programme définit les valeurs minimales et maximales des abscisses et des ordonnées du graphique.



3. a. $a = 0,588$; $b = 0,001$.

- b. Équation : $G = 0,588 \times C + 0,001$.

4. a. On a $G' = 2,71 \text{ mS}$ donc : $G' = 0,588 \times C' + 0,001$.

$$\text{soit } C' = \frac{G' - 0,001}{0,588} = \frac{2,71 - 0,001}{0,588} = 4,61 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

- b. $C_{\text{amp}} = 100 \times C' = 461 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} = 0,461 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

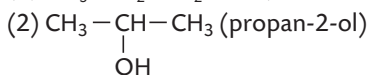
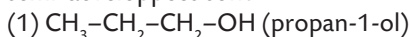
5. Il a été nécessaire de diluer la solution injectable car la valeur de la concentration C_{amp} est beaucoup plus grande que les valeurs des concentrations C en chlorure de calcium apporté des solutions étalons.

Programme complet ci-dessous :

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 # Données expérimentales
4 x = [10.0, 7.5, 5.0, 2.5, 1.0] # Ci en mmol/L
5 y = [5.88, 4.41, 2.94, 1.47, 0.59] # G en mS
6 # Affichage
7 plt.title("Courbe d'étalonnage G=f(C)")
8 plt.xlabel("C (mmol/L)")
9 plt.ylabel("G (mS)")
10 plt.plot(x, y, "bo", label="points expérimentaux")
11 plt.axis(xmin=0, xmax=10, ymin=0, ymax=6)
12 plt.grid(linestyle="-.")
13 plt.xticks(range(11))
14 # Modélisation fonction linéaire
15 modele=np.polyfit(x,y,1)
16 xm = np.linspace(0, 10, 10)
17 ym = modele[0]*xm + modele[1]
18 plt.plot(xm, ym, "r-", label="modèle y="+str(round(modele[0],3))+r"$\times x_m + $" +str(round(modele[1],3)))
19 print("Coefficient directeur du modèle " + str(round(modele[0],3)))
20 print("Ordonnée à l'origine du modèle " + str(round(modele[1],3)))
21 plt.legend()
22 plt.show()
```

22 Oxydation des alcools

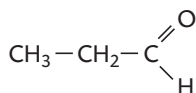
1. Il existe deux alcools avec 3 atomes de carbone dont les formules semi-développées sont :



2. (1) est un alcool primaire car l'atome de carbone fonctionnel est lié à un atome de carbone.

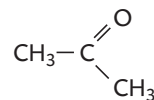
(2) est un alcool secondaire car l'atome de carbone fonctionnel est lié à deux atomes de carbone.

3. L'oxydation ménagée de l'alcool (1) peut conduire à :



qui est un aldéhyde.

L'oxydation ménagée de l'alcool (2) peut conduire à :



qui est une cétone.

4. Le spectre **a** comporte deux bandes moyennes et fines entre 2 700 et 2 900 cm^{-1} caractéristiques de la liaison $\text{C-H}_{\text{aldéhyde}}$ et une bande forte et fine centrée sur 1 730 cm^{-1} caractéristique de la liaison $\text{C=O}_{\text{aldéhyde}}$. Ce spectre est donc celui de l'aldéhyde.

Le spectre **b** comporte une bande forte et fine centrée sur 1 710 cm^{-1} caractéristique de la liaison $\text{C=O}_{\text{cétone}}$. Ce spectre est donc celui de la cétone.

5. Si l'aldéhyde est oxydé en acide carboxylique, le spectre présentera une bande forte et très large entre 2 600 et 3 200 cm^{-1} caractéristique de la liaison $\text{O-H}_{\text{acide carboxylique}}$ facilement observable.

Vers le Bac

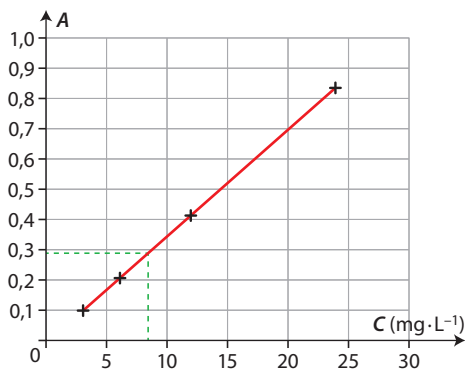
Préparation à l'écrit

23 CORRIGÉ Sirop de menthe glaciale

1. Le premier spectre présente une bande large et intense vers 3 300 cm^{-1} , caractéristique de la liaison O-H d'un alcool ; il correspond donc au menthol. Le deuxième spectre présente une bande fine et intense vers 1 700 cm^{-1} , caractéristique de la liaison C=O ; il correspond donc à la menthone.

2. Le spectre d'absorption du sirop présente un pic à environ 640 nm ; le sirop est donc de couleur bleu-vert.

3. La loi de Beer-Lambert indique que l'absorbance d'une solution est proportionnelle à sa concentration C en espèce absorbante. On reporte les points du tableau avec C en abscisse et A en ordonnée, puis on trace la droite passant au plus près de tous les points expérimentaux.



On détermine l'abscisse du point d'absorbance égale à 0,29, $C_s = 8,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Le sirop ayant été dilué 5 fois, sa concentration en masse en colorant E133 est donc $C = 5 \times C_s = 58,5 = 43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

4. La DJA du colorant E133 correspond, pour cet adolescent dont la masse corporelle est estimée à 60 kg, à une masse $m_{\text{max}} = 6,0 \times 60 = 360 \text{ mg}$. Cette valeur est environ 8 fois plus grande que la masse de colorant E133 dans un litre de sirop. Cet adolescent ne dépasserait donc pas sa DJA pour ce colorant E133.

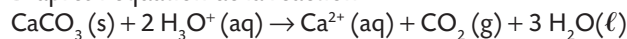
24 CORRIGÉ Sol truffier

1. L'acide chlorhydrique doit être introduit en excès afin que le carbonate de calcium $\text{CaCO}_3(s)$ soit le réactif limitant.

2. On applique l'équation d'état du gaz parfait : $P \times V = n \times R \times T$. La quantité de CO_2 formé est alors :

$$n(\text{CO}_2) = \frac{P \times V}{R \times T} = \frac{1,015 \times 10^2 \times 72 \times 10^{-6}}{8,314 \times 293} = 3,00 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

D'après l'équation de la réaction :



$$n(\text{CaCO}_3) = n(\text{CO}_2) = 3,00 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

La masse de carbonate de calcium dans l'échantillon de terre est : $m(\text{CaCO}_3) = n(\text{CaCO}_3) \times M(\text{CaCO}_3)$

$$= 3,00 \times 10^{-3} \times (40,1 + 12,0 + 3 \times 16,0) = 3,00 \times 10^{-1} \text{ g.}$$

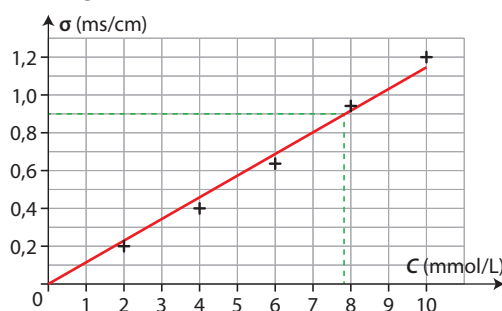
Le pourcentage massique en carbonate de calcium du sol analysé est :

$$\frac{3,00 \times 10^{-1}}{1,2} = 0,25 = 25 \text{ \%}.$$

Ce pourcentage est bien compris entre 20 % et 60 % : le sol analysé est favorable à la culture de la truffe.

Préparation à l'ECE

1. On trace le graphe σ en fonction de C puis on trace la droite d'étalonnage qui passe au plus près de tous les points expérimentaux et par l'origine.



Pour la valeur $\sigma_{\text{sérum dilué}} = 0,90 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, on détermine graphiquement la concentration en chlorure de sodium du sérum dilué :

$$C_{\text{sérum dilué}} = 7,8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

La solution de sérum physiologique ayant été diluée 20 fois, la concentration en chlorure de sodium de cette solution est :

$$C_{\text{sérum}} = 20 \times C_{\text{sérum dilué}} = 20 \times 7,8 = 0,156 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \approx 0,16 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

La concentration en masse en chlorure de sodium de la solution de sérum physiologique est alors :

$$t = C_{\text{sérum}} \times M(\text{NaCl}) = 0,156 \times 58,5 = 9,126 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \approx 9,1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$2. \text{Écart relatif} : 100 \times \frac{9,126 - 9,0}{9,0} = 1,4 \text{ \%}.$$

Le contrôle qualité est considéré comme satisfaisant car l'écart relatif est inférieur à 5 %.

Sujet complet fourni dans la version numérique :

Une ampoule de sérum physiologique contient une solution aqueuse de chlorure de sodium $\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$ de concentration en masse en chlorure de sodium égale à $9,0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

Matériel mis à disposition :

- Solution mère S_0 de concentration en chlorure de sodium $C_0 = 10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Solution de sérum physiologique (flacon du professeur).
- Eau distillée.
- Cinq tubes à essais sur support et bouchons.
- Deux burettes graduées 25,0 mL.
- Une fiole jaugée 100,0 mL.
- Une pipette jaugée de 5,0 mL + poire à pipeter.
- Un bécher de 150 mL.
- Un conductimètre avec cellule conductimétrique ;
- Une solution étalon de KCl à $0,010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pour l'étalonnage du conductimètre.
- Un godet pour les mesures de la conductivité.
- Une notice d'utilisation du conductimètre.

Complément scientifique

Un contrôle qualité est considéré comme satisfaisant si l'écart relatif entre la grandeur de référence indiquée par le fabricant et la même grandeur mesurée expérimentalement est inférieur à 5 %.

Données

- $M(\text{NaCl}) = 58,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Masse volumique du sérum physiologique : $\rho \approx 1,00 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$.

A Dilution – Facteur de dilution F

Une solution fille est obtenue par dilution d'une solution mère d'un facteur F appelé facteur de dilution.

| | |
|-----------------------|-----------------------------|
| Solution fille S_i | Solution mère S_0 |
| Concentration : C_i | Concentration : $C_0 > C_i$ |
| Volume : V_i | Volume : $V_0 < V_i$ |

$$\text{Facteur de dilution : } F = \frac{V_i}{V_0} = \frac{C_0}{C_i} > 1$$

B Préparation des solutions étalon en chlorure de sodium

À partir de la solution mère S_0 de concentration molaire $C_0 = 10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ en chlorure de sodium, on souhaite préparer, par dilution, quatre solutions filles notées S_1, S_2, S_3 et S_4 , de même volume $V_i = 20,0 \text{ mL}$ et de concentration C_i différentes.

Vers l'oral

À deux, c'est mieux

Le faisceau laser dirigé vers une roche la chauffe. Celle-ci émet alors de la lumière qui est captée par la caméra. Le spectre de cette lumière est ensuite réalisé, ce qui permet de déterminer la composition de la roche.

Je m'exprime à l'oral sur

La spectroscopie infrarouge (IR)

• Qu'est-ce que la spectroscopie infrarouge ?

La spectroscopie infrarouge est une technique d'analyse des molécules qui permet d'obtenir des informations sur une molécule en analysant son spectre d'absorption infrarouge.

1. RÉA Compléter le tableau suivant :

| Solution | S_0 | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V_0 (mL) | 20,0 | 16,0 | 12,0 | 8,0 | 4,0 |
| V_{eau} (mL) | 0,0 | | | | |
| V_i (mL) | 20,0 | | | | |
| F | | | | | |
| C_i (mmol · L ⁻¹) | 10 | | | | |

Protocole expérimental

- Préparer les solutions filles en utilisant le doc. B et le matériel disponible.
- Étalonner le conductimètre avec la solution de KCl à $0,010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Mesurer la conductivité σ_{ED} de l'eau distillée utilisée pour préparer les solutions filles.
- Mesurer la conductivité σ'_i des solutions filles en commençant par la solution la plus diluée et compléter le tableau suivant :

| Solution | S_0 | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ'_i (mS · cm ⁻¹) | | | | | |
| $\sigma_i = \sigma'_i - \sigma_{\text{ED}}$ (mS · cm ⁻¹) | | | | | |
| C_i (mmol · L ⁻¹) | | | | | |

- Dans les mêmes conditions, mesurer la conductivité d'une solution de sérum physiologique diluée 20 fois.

Exploitation des résultats et détermination de la concentration en chlorure de sodium du sérum physiologique

1. ANA - RAIS Expliquer la valeur non nulle de σ_{ED} . Indiquer alors ce que représente σ_i .
2. RÉA Tracer la courbe d'étalonnage σ_i en fonction des concentrations C_i .
3. VAL Préciser l'allure du graphe obtenu. Conclure.
4. RÉA a. Déterminer la concentration $C_{\text{sérum dilué}}$ à l'aide de la courbe d'étalonnage.
b. En déduire la concentration $C_{\text{sérum}}$ en chlorure de sodium du sérum physiologique.
c. Calculer la concentration en masse $t_{\text{sérum}}$ correspondante.
5. VAL Le résultat obtenu satisfait-il au contrôle qualité ?

• Comment identifier un groupe caractéristique à l'aide d'un spectre IR ?

Pour identifier un groupe caractéristique dans un spectre IR, il faut rechercher la présence du (ou des) pic(s) d'absorption des liaisons présentes dans ce groupe caractéristique.

• Quelles sont les limites de la spectroscopie IR ?

La spectroscopie IR permet d'identifier les groupes caractéristiques de la molécule dont on étudie de spectre, mais elle ne permet pas d'identifier la molécule.

• Un spectre IR permet-il d'établir la formule semi-développée d'une molécule ?

Un spectre IR permet de déterminer la nature des liaisons présentes dans une molécule et donc d'en identifier les groupes caractéristiques, mais pas la formule semi-développée de la molécule.

3

Méthodes chimiques d'analyse

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 1. Détermination la composition d'un système par des méthodes physiques et chimiques | |
|--|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| C) Analyser un système par des méthodes chimiques | |
| Titre massique et densité d'une solution. | Réaliser une solution de concentration donnée en soluté apporté à partir d'une solution de titre massique et de densité fournis. |
| Titration avec suivi pH-métrique. | Établir la composition du système après ajout d'un volume de solution titrante, la transformation étant considérée comme totale. |
| Titration avec suivi conductimétrique. | Exploiter un titrage pour déterminer une quantité de matière, une concentration ou une masse. Dans le cas d'un titrage avec suivi conductimétrique, justifier qualitativement l'évolution de la pente de la courbe à l'aide de données sur les conductivités ioniques molaires. <i>Mettre en œuvre le suivi pH-métrique d'un titrage ayant pour support une réaction acide-base.</i> <i>Mettre en œuvre le suivi conductimétrique d'un titrage.</i> Capacité numérique : Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, l'évolution des quantités de matière des espèces en fonction du volume de solution titrante versé. |

Liens avec les programmes officiels de seconde et de première

| Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|---|--|---------------------|
| SECONDE | | |
| Mélange stœchiométrique. | | |
| PREMIÈRE | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Composition massique d'un mélange. • Titration avec suivi colorimétrique. • Réaction support du titrage. • Réactif limitant et changement de réactif limitant au cours du titrage. • Définition de l'équivalence. • Repérage de l'équivalence. | <ul style="list-style-type: none"> • Relier qualitativement l'évolution des quantités de matière de réactifs et de produits à l'état final à la quantité de solution titrante ajoutée. • Relier l'équivalence au changement de réactif limitant et à l'introduction des réactifs en proportions stœchiométriques. • Établir la relation entre les quantités de matière de réactifs | |
| TERMINALE | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Titre massique. • Densité d'une solution. • Titration avec suivi pH-métrique. • Titration avec suivi conductimétrique. | <ul style="list-style-type: none"> • Exploiter un titrage pour déterminer une quantité de matière, une concentration ou une masse. • Établir la composition du système après ajout d'un volume de solution titrante, la transformation étant considérée comme totale. • Dans le cas d'un titrage avec suivi conductimétrique, justifier qualitativement l'évolution de la pente de la courbe à l'aide de données sur les conductivités ioniques molaires. • Mettre en œuvre un suivi pH-métrique avec une réaction acide-base et conductimétrique. Capacité numérique : Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, l'évolution des quantités de matière des espèces en fonction du volume de solution titrante versé. | |

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo : Titrage

La solution présente une coloration violette. Les ions permanganate MnO_4^- (aq) sont à l'origine de cette coloration et correspondent

au réactif en excès. Puisque le réactif titrant MnO_4^- (aq) est en excès, c'est donc que l'on se situe après l'équivalence.

Flash test

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

Activité 1

expérimentale Préparer une solution

Capacités exigibles

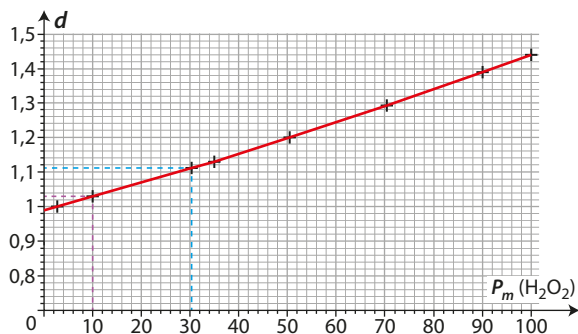
- S'approprier la notion de densité et de titre massique.
- Réaliser une solution de concentration donnée en soluté apporté à partir d'une solution de titre massique et de densité fournis.

Matériel et produits disponibles :

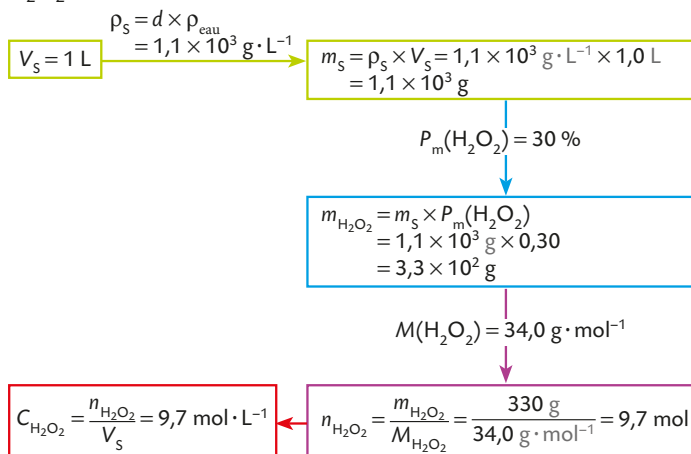
- Gants.
- Lunettes.
- Pipettes jaugées de 10, 20 et 25 mL.
- Propipette.
- Bécher de 100 mL.
- Fiole jaugée de 100 mL.
- Eau oxygénée à 30 %.

Pratique expérimentale

1 La solution d'eau oxygénée fournie admet un pourcentage massique $P_m(H_2O_2)$ en peroxyde d'hydrogène de 30 %. En reportant dans le graphique du doc. B le pourcentage massique, la détermination de la densité est possible. On obtient : $d = 1,1$.



2 Détermination de la concentration en peroxyde d'hydrogène H_2O_2 de la solution commerciale S :



Pour détacher un linge, la concentration en peroxyde d'hydrogène de la solution doit être comprise entre $2,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et $4,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Il suffit donc de réaliser une dilution au quart. La solution diluée sera telle que $[H_2O_2] = 2,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Proposition de protocole de la solution diluée $S_{\text{diluée}}$:

- À l'aide de gants et muni de lunettes, prélever 25 mL de la solution commerciale prélevés à l'aide d'une pipette jaugée et les verser dans une fiole jaugée de 100 mL.
- Verser de l'eau distillée jusqu'à remplir à moitié la fiole.
- Homogénéiser la solution.
- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser.

3 La solution obtenue a un pourcentage massique $P_m(H_2O_2)$ égal à 7,5 %. Pour compléter l'étiquetage, il faut déterminer :

- la densité de la solution diluée $S_{\text{diluée}}$: on reporte de nouveau le pourcentage massique dans le graphe du document B. On obtient $d = 1,02$;
- les mentions de danger et les pictogrammes : d'après les données, pour une solution d'eau oxygénée de pourcentage massique $P_m(H_2O_2)$ égal à 7,5 %, la mention de danger est H319 et le pictogramme est :



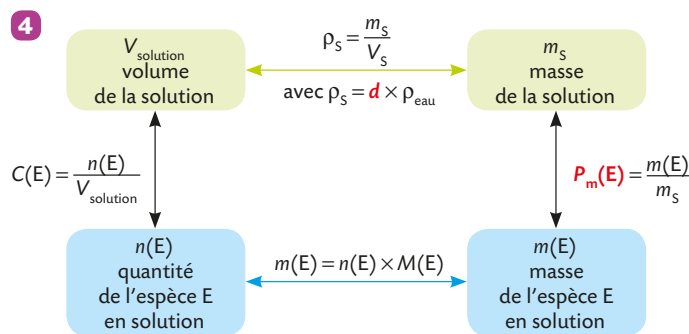
Étiquette :

Peroxyde d'hydrogène

Eau oxygénée 7,5 %
 $M = 34 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $d = 1,02$

H319 : Provoque des lésions oculaires

Un pas vers le cours



Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

Dans un laboratoire de lycée, plusieurs solutions commerciales sont disponibles. Toutes sont corrosives et nécessitent le port de lunettes et de gants. Plusieurs nécessitent par ailleurs l'usage d'une hotte. La solution de peroxyde d'hydrogène à 30 % nous semble être le meilleur compromis.

Capacité exigible

- Mettre en œuvre un suivi pH-métrique

Matériel et produits disponibles :

- Un pH-mètre et une sonde de pH.
- Support à sonde de pH.
- Burette graduée de 25 mL.
- Potence.
- Agitateur magnétique et un barreau aimanté.
- Bécher de 100 mL.
- Pipette jaugée de 20 mL.
- Propipette.
- Limonade* dégazée, $V \approx 30$ mL.
- Solution d'hydroxyde de sodium telle que : $[\text{HO}^-] = 5,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $V \approx 30$ mL.

* Il est aussi possible de fournir la limonade et de faire dégazer le dioxyde de carbone avec un montage de chauffage à reflux.

1 Étapes de la démarche de résolution :

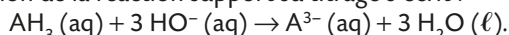
1^{re} étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter.

1. La limonade est une solution aqueuse contenant pour 1 L de solution 91 g de glucides et une masse non indiquée d'acide citrique. Cette solution est gazéifiée par du dioxyde de carbone CO_2 (aq). Les glucides sont apportés par le sucre et le jus de citron. L'acide citrique est apporté par le jus de citron.

2. La solubilité du dioxyde de carbone diminue avec la température. Le dioxyde de carbone a des propriétés acides.

3. Il est possible de titrer l'acide citrique AH_3 (aq) contenue dans 20,0 mL de limonade par une solution d'hydroxyde de sodium Na^+ (aq) + HO^- (aq) telle que $[\text{HO}^-] = 5,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. La réaction de titrage est une réaction acide-base, il convient préalablement d'éliminer le dioxyde de carbone qui peut interférer dans le titrage.

L'équation de la réaction support su titrage s'écrit :



4. L'équivalence peut être déterminée en exploitant la courbe $\text{pH} = f(V_{\text{versé}})$.

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

Quels sont le volume de jus de citron et la masse de sucres nécessaires à la préparation d'un litre de limonade ?

3^e étape : Émettre une hypothèse permettant d'y répondre

Les glucides sont majoritairement apportés par le sucre de canne et en partie par le jus de citron.

L'acide citrique provient du jus de citron.

Pour déterminer l'acide citrique, il convient d'éliminer préalablement le dioxyde de carbone dissous.

4^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

• On élimine le dioxyde de carbone dissous dans une limonade en chauffant à l'aide d'un montage de chauffage à reflux.

• On réalise le titrage de l'acide citrique AH_3 (aq) contenu dans un volume $V_0 = 20,0$ mL de limonade dégazéifiée par une solution d'hydroxyde de sodium Na^+ (aq) + HO^- (aq) telle que $[\text{HO}^-] = 5,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le suivi de ce titrage se fait par pH-métrie.

5^e étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

- Tracer la courbe $\text{pH} = f(V_{\text{versé}})$ et déterminer par la méthode des tangentes le volume V_E versé à l'équivalence.
- Exploiter l'équivalence pour déterminer la quantité d'acide citrique contenu dans 20,0 mL puis dans 1 L de limonade.
- Déterminer le volume de jus de citron permettant d'apporter la quantité d'acide citrique nécessaire à la préparation d'un litre de limonade.
- En déduire la quantité de glucides apportés par ce jus.
- Déterminer la masse de sucre à ajouter à 1 L d'eau gazeuse.

Résolution proposée :

La limonade est une solution aqueuse gazeuse contenant de l'acide citrique apporté par du jus de citron et des glucides apporté essentiellement par le sucre. L'étiquette donne la concentration en masse des glucides mais elle ne donne aucune information sur la quantité d'acide citrique.

Pour rédiger une recette de limonade, il faut déterminer le volume de jus de citron à introduire.

• Détermination de la concentration en acide citrique de la limonade

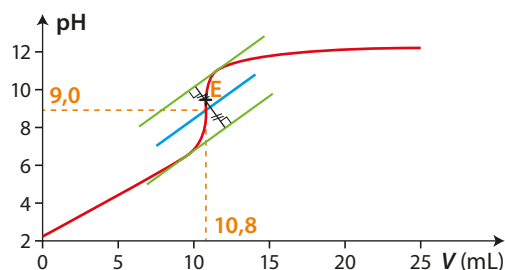
La quantité d'acide citrique de la limonade peut être déterminée par un titrage suivi par pH-métrie. Le dioxyde de carbone est un diacide qui se dissout dans phase aqueuse. Il convient donc de l'éliminer avant de réaliser le titrage de l'acide citrique dans la limonade.

– Élimination du dioxyde de carbone

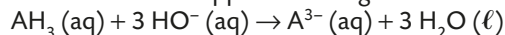
D'après le graphe du doc. C, la solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau diminue avec la température ; il convient donc de chauffer la limonade. On pourra utiliser un montage de chauffage à reflux de façon à rester à volume constant de limonade.

– Dosage de l'acide citrique après élimination du dioxyde de carbone CO_2 , H_2O (aq)

Le dispositif de titrage suivi par pH-métrie présenté au doc. B est réalisé. Les résultats suivants sont obtenus :



L'équation de la réaction support du titrage s'écrit :



À l'équivalence :

$$\frac{n_0(\text{AH}_3)}{1} = \frac{n_E(\text{HO}^-)}{3} \text{ soit } [\text{AH}_3] \times V_A = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{3}$$

$$\Rightarrow [\text{AH}_3] = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{3 \times V_A} = \frac{5,00 \times 10^{-2} \times 10,8}{3 \times 20,0} = 9,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

• Détermination des ingrédients de la « recette » de fabrication de la limonade

Il convient de déterminer le volume de jus de citron et la masse de sucre à apporter pour préparer 1 L de limonade.

| | Quantité nécessaire | Ingrédient |
|--|--|--|
| Acide citrique (fourni par le jus de citron) | Pour 1 L de solution, il faut $9,00 \times 10^{-3}$ mol d'acide citrique. | <ul style="list-style-type: none"> Détermination du volume V_0 de jus de citron nécessaire : $V_0 = \frac{n}{[AH_3]_{\text{jus}}} = \frac{9,00 \times 10^{-3}}{0,3} = 30 \text{ mL}$ 1 citron produit en moyenne 45 mL de jus donc $\frac{2}{3}$ citron suffit. |
| Glucide | D'après l'étiquette, 91 g de glucides sont nécessaires dans 1 L de limonade. | <ul style="list-style-type: none"> $\frac{2}{3}$ citron apporte : $\frac{2}{3} \times 2,5 = 1,6$ g de sucre. \Rightarrow il faut donc ajouter $91 - 1,6 = 89,4$ g de sucre pour préparer 1 L de limonade. |

La part de glucide apportée par le jus de citron est très faible. La masse de sucre à ajouter peut donc être de 90 g.

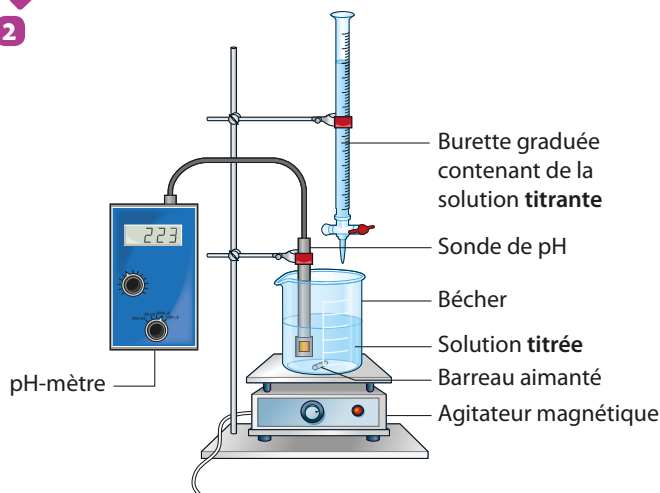
Voici une proposition de « recette » de limonade:

Dans un pot à eau de 1 L :

- ajouter 30 mL de jus de citron ($\frac{2}{3}$ d'un citron) ;
- ajouter 90 g de sucre ;
- ajouter 1 L avec de l'eau gazeuse (lorsqu'on réalise une recette, la verrerie disponible n'est pas aussi précise qu'au laboratoire. Il est difficile d'envisager de compléter la solution à 1 L).

Un pas vers le cours

2



Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------|---|---|---|---|---|
| S'approprier | <ul style="list-style-type: none"> – Citer les constituants essentiels de la limonade (eau gazeuse, glucides, acide citrique). – Identifier l'espèce chimique essentielle non quantifiée sur l'étiquette. – Identifier la concentration en masse des glucides à partir de l'étiquette. – Comprendre que le dioxyde de carbone dissous doit être éliminé. – Planifier un titrage suivi par pH-métrie pour déterminer la quantité d'acide citrique contenue dans 1 L de limonade. – Quels sont le volume de jus de citron et la masse de sucres nécessaires à la préparation d'un litre de limonade ? | | | | |
| Analyser | <ul style="list-style-type: none"> – Élaborer un protocole de dégazage du dioxyde de carbone dissous sans perte d'eau. – Exploiter le volume versé à l'équivalence pour déterminer la quantité de matière d'acide citrique AH_3 (aq) contenu dans 1 L de limonade. – Exploiter l'étiquette pour en déterminer le volume de jus de citron nécessaire pour préparer 1 L de limonade. | | | | |
| Réaliser | <ul style="list-style-type: none"> – Mettre en œuvre le protocole de dégazage en respectant les règles de sécurité. – Mettre en œuvre le titrage photographié. – Tracer le graphique $pH = f(V_{\text{versé}})$. – Déterminer le volume versé à l'équivalence à l'aide de la méthode des tangentes. | | | | |
| Valider | <ul style="list-style-type: none"> – Interpréter le graphique du doc. C et justifier le dégazage. – Faire preuve d'esprit critique. – Déterminer la quantité de sucre à ajouter pour préparer 1 L de limonade. | | | | |
| Communiquer | <ul style="list-style-type: none"> – Utiliser un vocabulaire scientifique rigoureux. – Rédiger la « recette » de préparation de 1 L de limonade. | | | | |

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Il convient pour avoir des résultats satisfaisants et une courbe exploitable de réaliser un dégazage parfait du dioxyde de carbone. Le chauffage est indispensable. On ne peut se contenter d'une simple agitation.

Activité 3

numérique Simuler une courbe de titrage

p. 53

Capacités exigibles

- Établir la composition du système après ajout d'un volume de solution titrante, la transformation étant considérée comme totale.
- Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, l'évolution des quantités de matière des espèces en fonction du volume de solution titrante versé.

Ressources numériques : fichiers Python, version pour l'élève et version complète pour le professeur

Erratum : erreur dans le spécimen corrigée dans le manuel de l'élève : Dans le doc. A, programme, ligne 29 : dans le calcul de la conductivité, un terme manque au dénominateur, le terme 0.015 correspondant à la prise d'essai. On doit avoir :

```
Conduct = (20*np.array(n_HO)+5.0*np.array(n_Na)+4.1\
*np.array(n_A))/(0.015+Veau*1E-3+1E-3*np.array(V))
```

Simulation numérique

1 À l'équivalence :

$$\frac{n_0(\text{AH})}{1} = \frac{n_E(\text{HO}^-)}{1} \text{ soit } [\text{AH}] \times V_0 = [\text{HO}^-] \times V_E$$

$$\Rightarrow V_E = \frac{[\text{AH}] \times V_0}{[\text{HO}^-]} = \frac{0,145 \times 10,0}{0,100} = 14,5 \text{ mL.}$$

Le volume équivalent V_E est égal à 14,5 mL.

2 Pour connaître les quantités de matière après l'équivalence, un tableau d'avancement peut être dressé. L'acide AH est le réactif limitant.

| Équation de la réaction | | AH (aq) + HO ⁻ (aq) → A ⁻ (aq) + H ₂ O (ℓ) | | | |
|-------------------------|---------------------|---|---------------------------|--------------------|---------------------|
| État du système | Avancement (mol) | Quantités de matière (mol) | | | |
| | | n(AH) | n(HO ⁻) | n(A ⁻) | n(H ₂ O) |
| État initial | $x = 0$ | 0,00145 | $0,10 \times V$ | 0 | excès |
| État intermédiaire | $0 < x < x_f$ | $0,00145 - x$ | $0,10 \times V - x$ | $0 + x$ | excès |
| État final | $x = x_f = 0,00145$ | 0 | $0,10 \times V - 0,00145$ | 0,00145 | excès |

L'écriture de la fonction découle de ce tableau d'avancement :

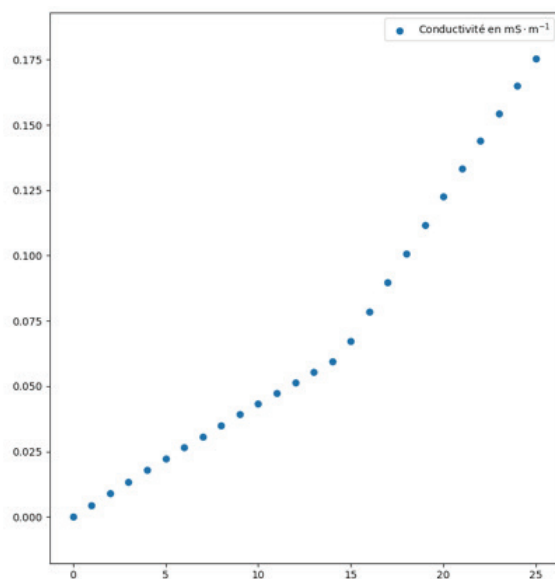
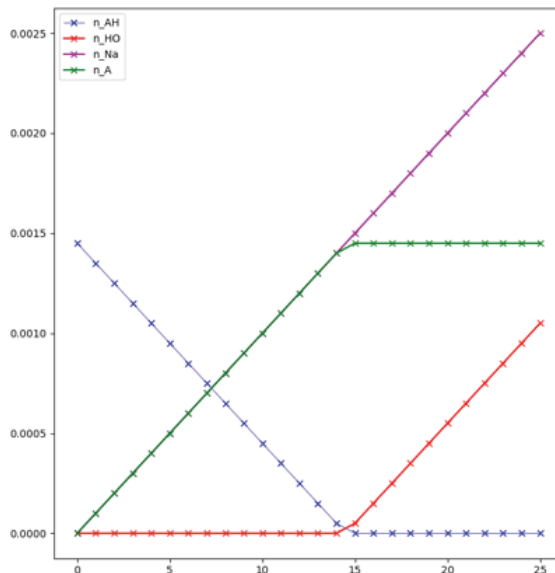
```
def calcul_quantites_apres_equivalence(i) :
```

```
# Ajout à la liste des volumes le volume V versé pour V > VE
V.append(i)
# Ajout à la liste des quantités de AH la valeur 0 car AH réactif limitant
n_AH.append(0)
# Ajout pour chaque valeur de V = i (en mL) la quantité de matière de HO-
n_HO.append((0.10*i*0.001 - 0.00145))
# Ajout pour chaque valeur de V = i (en mL) la quantité de matière de Na+
n_Na.append(0.10*i*0.001)
# Ajout pour chaque valeur de V = i (en mL) la quantité de matière de A- notée n_A
n_A.append(0.00145)
```

3 En s'inspirant de la ligne 32 du code, on peut tracer l'évolution de chaque quantité de matière des ions hydroxyde HO⁻ (aq), n_HO, des ions sodium Na⁺ (aq), n_Na et des ions A⁻ (aq), n_A :

```
plt.plot(V, n_HO, 'rx-', linewidth=0.5, label="n_HO")
plt.plot(V, n_Na, 'mx-', linewidth=0.5, label="n_Na")
plt.plot(V, n_A, 'gx-', linewidth=0.5, label="n_A")
```

4 a. En téléchargeant le programme puis en le complétant et en l'exécutant, les courbes ci-dessous sont obtenues :



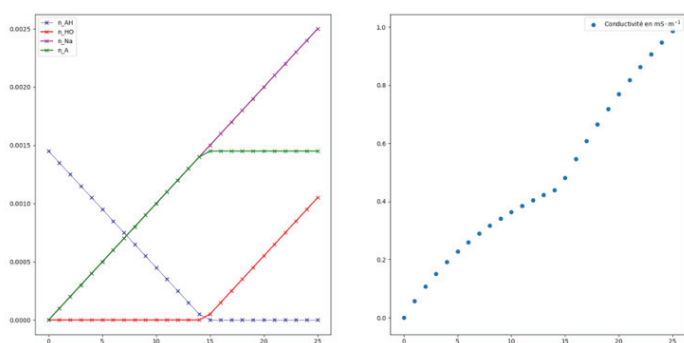
b. À l'équivalence, la quantité de AH, n_{AH} est nulle, il en est de même pour HO⁻. On peut ainsi déterminer le volume équivalent à 14,5 mL. Sur le graphe de la conductivité, on constate que l'on peut modéliser la courbe représentant la conductivité par deux droites de pentes différentes. Le point d'intersection de ces deux segments de droites a pour abscisse le volume versé à l'équivalence. La détermination de l'équivalence est donc alors possible.

Si on ne s'intéresse qu'aux espèces ioniques qui sont les seules à intervenir dans la conductivité, on constate :

- qu'avant l'équivalence, les quantités des ions A⁻ et des ions Na⁺ augmentent, ce qui explique que la conductivité croît ;
- qu'après l'équivalence, les quantités des ions Na⁺ et des ions HO⁻ augmentent également, ce qui explique que la conductivité croît. Les ions hydroxyde HO⁻ (aq) sont plus conducteurs : la pente de la deuxième droite est plus élevée.

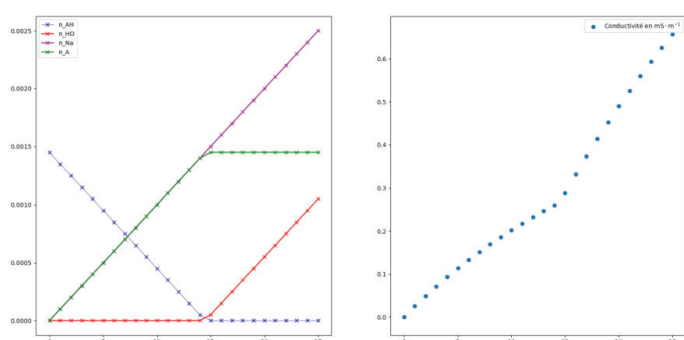
5 En modifiant la valeur du volume d'eau versé initialement et en compilant le programme, les courbes évoluent :

• $V_{\text{eau}} = 0 \text{ mL}$



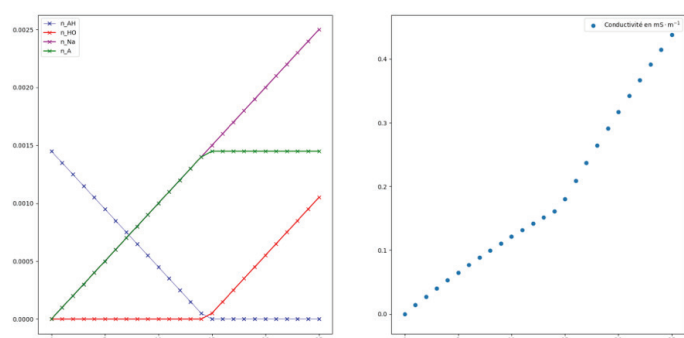
⇒ La courbe n'est pas constituée de deux segments de droites, il sera difficile de repérer l'équivalence.

• $V_{\text{eau}} = 20 \text{ mL}$



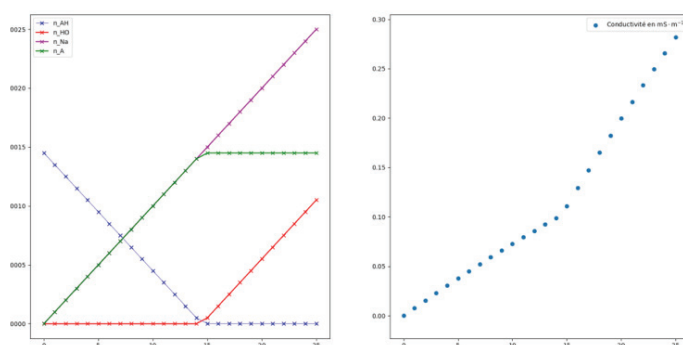
⇒ La courbe n'est pas constituée de deux segments de droites, il sera difficile de repérer l'équivalence.

• $V_{\text{eau}} = 50 \text{ mL}$



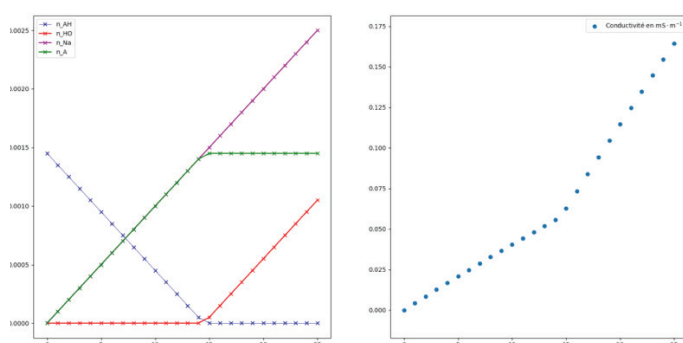
⇒ La courbe n'est pas constituée de deux segments de droites, il sera difficile de repérer l'équivalence.

• $V_{\text{eau}} = 100 \text{ mL}$



⇒ La courbe n'est toujours pas constituée de deux segments de droites, il sera difficile de repérer l'équivalence.

• $V_{\text{eau}} = 200 \text{ mL}$

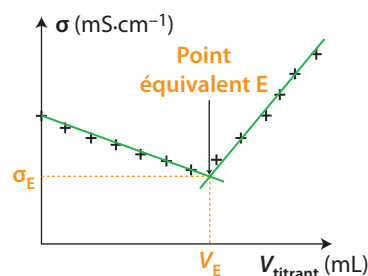


⇒ La courbe est constituée de deux segments de droites.

• Pour pouvoir obtenir des droites, il faut verser initialement un volume d'eau initial important ($V_{\text{eau}} \approx 10 V_{\text{versé}}$). On peut ainsi négliger la dilution.

Un pas vers le cours

6 Dans un suivi par conductimétrie, l'évolution de la conductivité peut être modélisée par deux segments de droite de pentes différentes. Une rupture de pente est donc visible. Le point d'intersection des segments permet de repérer l'équivalence du titrage.



Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité est construite pour expliquer l'intérêt d'une programmation pour simuler un titrage.

Activité 4

expérimentale Titrage suivi par conductimétrie

p. 54

Capacités exigibles

- Mettre en œuvre un suivi par conductimétrie.
- Exploiter un titrage pour déterminer une quantité de matière, une concentration ou une masse.

Remarque

L'objectif de l'activité est de montrer que la chauffeurette est souvent défaillante à cause d'un problème au niveau du disque et non à cause du pourcentage massique en éthanoate de sodium. Si on ne dispose pas de chauffeurette défaillante et donc de solution, on peut préparer au laboratoire la solution S_f telle que $[\text{CH}_3\text{CO}_2^-] = [\text{Na}^+] = 0,161 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Erratum : erreur dans le spécimen corrigée dans le manuel de l'élève : La solution titrante d'acide chlorhydrique est telle que $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,00 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et non $1,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et son incertitude type $u([\text{H}_3\text{O}^+]) = 4,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Matériel :

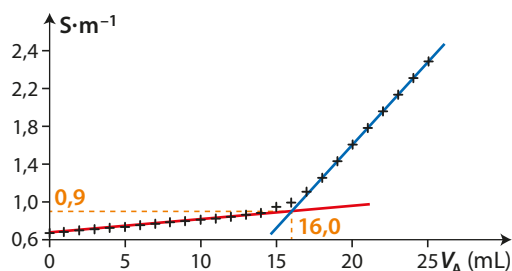
- Un conductimètre et une cellule de conductimétrie.
- Support à cellule de conductimétrie.
- Burette graduée de 25 mL.
- Potence.
- Agitateur magnétique + barreau aimanté.
- Bécher de 400 mL.
- Pipette jaugée de 10 mL.
- Propipette.

Produits disponibles :

- Solution S_f dilution au $1/25$ de la solution contenue dans une chauffeurette ou dilution au $1/25$ de la solution S_0 . La solution S_f est telle que : $[\text{CH}_3\text{CO}_2^-] = [\text{Na}^+] = 0,161 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $V = 20,0 \text{ mL}$.
- Solution d'acide chlorhydrique H_3O^+ (aq) + Cl^- (aq) telle que $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,00 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $V \approx 30 \text{ mL}$.

Pratique expérimentale

- 1 Réalisation du dosage suivi par conductimétrie.
- 2 Le graphe de la conductivité en fonction du volume V_A versé est tracé. On modélise l'évolution par deux segments de droite de pentes différentes. L'intersection des deux segments de droite permet de déterminer l'équivalence.



- 3 L'équation de la réaction support du titrage s'écrit : $\text{CH}_3\text{CO}_2^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell)$
À l'équivalence : $\frac{n_0(\text{CH}_3\text{CO}_2^-)}{1} = \frac{n_E(\text{H}_3\text{O}^+)}{1}$ soit $[\text{CH}_3\text{CO}_2^-] \times V_0 = [\text{H}_3\text{O}^+] \times V_E$

$$\Rightarrow [\text{CH}_3\text{CO}_2^-] = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times V_E}{V_0} = \frac{1,00 \times 10^{-1} \times 16,0}{10,0} = 1,60 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

- 4 a. La solution contenue dans la chauffeurette est 25 fois plus concentrée soit :

$$[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]_{\text{chauffeurette}} = 25 \times [\text{CH}_3\text{CO}_2^-] = 4,00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

On considère un volume V de solution de chauffeurette, le pourcentage massique s'exprime par :

$$P_m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}) = \frac{m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})}{m(\text{solution})} = \frac{n(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}) \times M(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})}{\rho \times V} = \frac{n(\text{CH}_3\text{CO}_2^-) \times M(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})}{\rho \times V}$$

$$\text{Soit } P_m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}) = \frac{[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]_{\text{chauffeurette}} \times V \times M(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})}{\rho \times V} = \frac{25 \times [\text{CH}_3\text{CO}_2^-] \times M(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})}{\rho} = \frac{25 \times [\text{H}_3\text{O}^+] \times V_E \times M(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})}{\rho \times V_0}$$

$$P_m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}) = \frac{25 \times 1,00 \times 10^{-1} \times 16,0 \times 10^{-3} \times 82,0}{1,15 \times 10} = 28,5 \%$$

- b. Pour simplifier le problème, on considère que le facteur de dilution n'a pas engendré d'erreur. On obtient donc :

$$u(P_m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})) = P_m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}) \times \sqrt{\left(\frac{u([\text{H}_3\text{O}^+])}{[\text{H}_3\text{O}^+]}\right)^2 + \left(\frac{u(V_E)}{V_E}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{u(V_0)}{V_0}\right)^2}$$

$$\text{soit } u(P_m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})) = 0,285$$

$$\times \sqrt{\left(\frac{4,00 \times 10^{-3}}{1,00 \times 10^{-1}}\right)^2 + \left(\frac{0,03 \times 16,0}{16,0}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{1,15}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{10,0}\right)^2}$$

$$u(P_m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na})) = 0,02 = 2 \%$$

donc $P_m(\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}) \in [0,26 ; 0,30]$.

- 5 La défaillance de la chauffeurette n'est pas due au pourcentage massique en éthanoate de sodium. Il y a sûrement un problème avec le disque métallique qui éjecte mal les cristaux d'éthanoate de sodium.

Un pas vers le cours

- 6 1 Écrire l'équation de la réaction support du titrage : $aA(\text{aq}) + bB(\text{aq}) \rightarrow cC(\text{aq}) + dD(\text{aq})$

- 2 Écrire la relation à l'équivalence en tenant compte des nombres stœchiométriques :

$$\text{Quantité de matière initiale de réactif titré A dans le bécher (mol)} \quad \xrightarrow{\quad} \quad \frac{n_0(A)}{a} = \frac{n_E(B)}{b} \quad \xleftarrow{\quad} \quad \text{Quantité de matière de réactif titrant B versé à l'équivalence (mol)}$$

- 3 Remplacer les quantités de matière à l'aide des expressions :

$$n_A = C_A \times V_A \text{ ou } n_A = \frac{m_A}{M_A} \text{ soit : } \frac{m_A}{M_A \times a} = \frac{C_B \times V_E}{b}$$

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité complète permet de réaliser un titrage suivi par conductimétrie et de l'exploiter. Elle permet d'introduire les notions sur l'estimation des incertitudes des grandeurs mesurées.

Capsules vidéos de cours :

- Titrage
- Titrage conductimétrique

QCM

p. 59

1. A et C ; 2. A et C ; 3. B et C ; 4. B ; 5. A, B et C ; 6. B ; 7. A et B ; 8. A et C ; 9. A ; 10. A et B.

Exercices

Appliquer le cours

p. 62

3 Déterminer une concentration

• Détermination de la concentration en H_2SO_4 de la solution commerciale :

$$V_s = 1 \text{ L} \xrightarrow{\rho_s = 1,815 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}} m_s = \rho_s \times V_s = 1,815 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \times 1,0 \text{ L} = 1,815 \times 10^3 \text{ g}$$

$$P_m(\text{H}_2\text{SO}_4) = 90\%$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = m_s \times P_m(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,815 \times 10^3 \text{ g} \times 0,90 = 1\,634 \text{ g}$$

$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{n_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{V_s} = 16,7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \quad \leftarrow n_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{m_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{M_{\text{H}_2\text{SO}_4}} = \frac{1\,634 \text{ g}}{98,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 16,7 \text{ mol}$$

• Détermination de la concentration en ions $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ de la solution commerciale :

D'après l'équation de la réaction de l'acide sulfurique avec l'eau, $n(\text{H}_3\text{O}^+) = n(\text{H}_2\text{SO}_4)$, donc $C_{\text{H}_3\text{O}^+} = 2 \times C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 33,3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

• Détermination de la concentration en ions $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ de la solution S : $C_s = C_{\text{H}_3\text{O}^+} \times \frac{15}{1,0 \times 10^3} = 0,50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

4 Préparer une solution de concentration donnée en soluté

1. Détermination de la concentration en ammoniac de la solution commerciale S :

$$V_s = 1 \text{ L} \xrightarrow{\rho_s = 0,95 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}} m_s = \rho_s \times V_s = 0,95 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \times 1,0 \text{ L} = 0,95 \times 10^3 \text{ g}$$

$$P_m(\text{NH}_3) = 28\%$$

$$m_{\text{NH}_3} = m_s \times P_m(\text{NH}_3) = 0,95 \times 10^3 \text{ g} \times 0,28 = 266 \text{ g}$$

$$M(\text{NH}_3) = 17,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$C_{\text{NH}_3} = \frac{n_{\text{NH}_3}}{V_s} = 15,6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \quad \leftarrow n_{\text{NH}_3} = \frac{m_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NH}_3}} = \frac{266 \text{ g}}{17,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 15,6 \text{ mol}$$

Lors de la dilution, la quantité de matière se conserve :

$$C_s \times V_s = C_f \times V_f \text{ soit } V_s = \frac{C_f \times V_f}{C_s} = 70,3 \text{ mL}$$

2. Pour préparer la solution, il faut une éprouvette de 100 mL et une fiole jaugée de 1,0 L.

5 Identifier une relation à l'équivalence

1. Les ions calcium $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$ correspondent au réactif titré et les ions hydroxyde $\text{HO}^-(\text{aq})$ au réactif titrant.
2. La réaction support d'un titrage doit être rapide et totale.
3. La relation qui correspond à l'équivalence du titrage étudié est a).

6 Établir une relation à l'équivalence

1. À l'équivalence :

$$\frac{n_1(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4)}{1} = \frac{n_2(\text{HO}^-)}{2}$$

2. D'après la relation à l'équivalence :

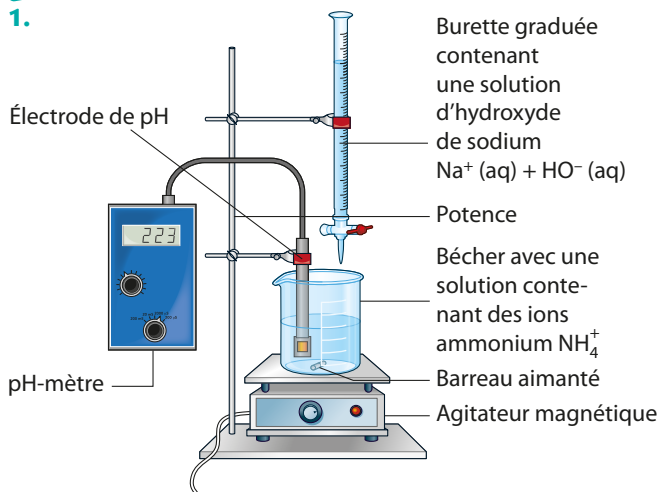
$$\frac{[\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4] \times V_1}{1} = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{2} \Rightarrow [\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4] = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{2V_1}$$

Application numérique :

$$[\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4] = \frac{1,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 15,7 \text{ mL}}{2 \times 10 \text{ mL}} = 7,85 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

7 Légèrer un schéma de montage de titrage

1.

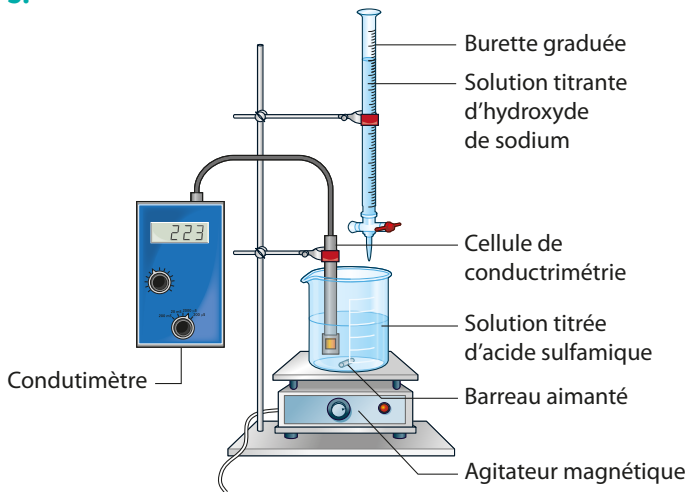


2. L'équation de la réaction support du titrage s'écrit : $\text{NH}_4^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell)$

8 Dessiner un montage de titrage

1. La courbe peut être modélisée par deux segments de droite de pentes différentes. Elle est caractéristique d'une courbe obtenue par suivi conductimétrique. La grandeur mesurée est donc la conductivité ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$).
2. Le titrage a été suivi par conductimétrie.

3.



9 Repérer l'équivalence d'un titrage conductimétrique

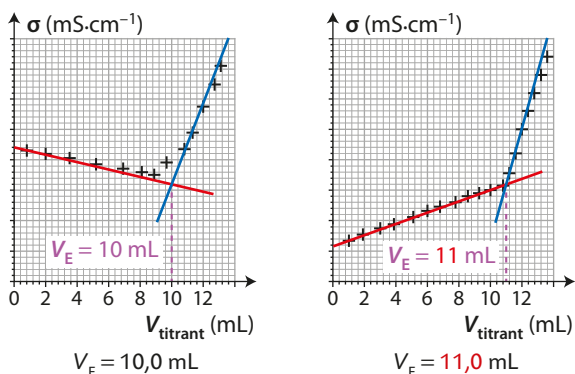
1. On trace les deux segments de droite. À l'intersection, le volume versé à l'équivalence est lu : $V_E = 6,9$ mL.

2. À l'équivalence : $n(\text{NH}_4^+) = n(\text{HO}^-)$ soit :

$$C_A \times V_A = C_B \times V_E \text{ soit } C_A = C_B \times \frac{V_E}{V_A} = 1,4 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

10 Identifier une courbe de titrage

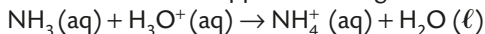
Pour déterminer le volume équivalent, il convient de tracer les deux segments de droite modélisant la courbe et de prendre l'intersection des deux segments de droite :



Le volume versé à l'équivalence est de 10,0 mL. La courbe de gauche correspond donc à celle du titrage.

11 Utiliser la courbe dérivée

1. L'équation de la réaction support du titrage s'écrit :

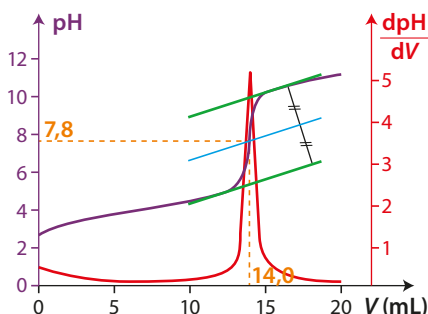


2. Le volume versé à l'équivalence est obtenu à l'extrémum (ici minimum) de la dérivée soit : $V_E = 14,0$ mL.

3. À l'équivalence : $n(\text{NH}_3) = n(\text{H}_3\text{O}^+)$ donc $C(\text{NH}_3) \times V_B = C_A \times V_E$ soit $C(\text{NH}_3) = C_A \times \frac{V_E}{V_B} = 1,05 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

12 Utiliser la méthode des tangentes

1. La courbe est la suivante :



Par la méthode des tangentes ou la méthode de la courbe dérivée, on obtient le volume versé à l'équivalence V_E égal à 14,0 mL.

2. À l'équivalence : $\frac{n_0(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6)}{1} = \frac{n_E(\text{HO}^-)}{1}$

$$\text{donc } \frac{[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6] \times V_A}{1} = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{1} \Rightarrow [\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6] = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{V_A}$$

Application numérique :

$$[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6] = \frac{4,00 \times 10^{-2} \times 14,0}{10,0} = 5,60 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

3. • La quantité de matière d'acide ascorbique contenue dans le sachet est donc égale à :

$$n_0 = [\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6] \times V_0 = 5,60 \times 10^{-2} \times 0,1000 = 5,60 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

• La masse d'acide ascorbique contenue dans le sachet est donc égale à :

$$m = 5,6 \times 10^{-3} \times 176 = 0,986 \text{ g soit } 986 \text{ mg.}$$

13 Établir la composition d'un système

1. a. $n(\text{AH}_2) = C_A \times V_1 = 0,400 \text{ mmol} > \frac{n(\text{HO}^-)}{2}$

$n(\text{AH}_2) = C_B \times \frac{V_B}{2} = 0,250 \text{ mmol}$, donc HO^- est le réactif limitant et $x_f = 0,250 \text{ mmol}$.

| Équation de la réaction | | $\text{AH}_2(\text{aq}) + 2 \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{A}^{2-}(\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\ell)$ | | | |
|-------------------------|-------------------|---|--------------------|--------------------|-------------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | | | |
| | | $n(\text{AH}_2)$ | $n(\text{HO}^-)$ | $n(\text{A}^{2-})$ | $n(\text{H}_2\text{O})$ |
| État initial | $x = 0$ | 0,400 | 0,500 | 0 | Excès |
| État final | $x = x_f$ | $0,400 - x_f = 0,150$ | $0,500 - 2x_f = 0$ | $x_f = 0,250$ | Excès |

b. $n(\text{AH}_2) = C_A \times V_1 = 0,400 \text{ mmol} < \frac{n(\text{HO}^-)}{2} = C_B \times \frac{V_B}{2} = 0,750 \text{ mmol}$, donc AH_2 est le réactif limitant et $x_f = 0,400 \text{ mmol}$.

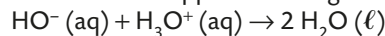
| Équation de la réaction | | $\text{AH}_2(\text{aq}) + 2 \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{A}^{2-}(\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\ell)$ | | | |
|-------------------------|-------------------|---|----------------------|--------------------|-------------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | | | |
| | | $n(\text{AH}_2)$ | $n(\text{HO}^-)$ | $n(\text{A}^{2-})$ | $n(\text{H}_2\text{O})$ |
| État initial | $x = 0$ | 0,400 | 1,50 | 0 | Excès |
| État final | $x = x_f$ | $0,400 - x_f = 0$ | $1,5 - 2x_f = 0,700$ | $x_f = 0,400$ | Excès |

2. a. Le réactif limitant correspond aux ions hydroxyde HO^- (aq), et $V < V_E$.

b. Le réactif limitant correspond à l'acide maléique AH_2 (aq), et $V > V_E$.

14 Exploiter la composition d'un système

1. L'équation de la réaction support du titrage s'écrit :



2. Si les ions hydroxyde HO^- (aq), initialement présents dans le bécher, sont encore présents et que les ions oxonium H_3O^+ ont tous été consommés, c'est donc que les ions hydroxyde HO^- (aq) sont en excès. Le système se trouve donc avant l'équivalence.

3.

| Équation de la réaction | | $\text{HO}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\ell)$ | | |
|-------------------------|-------------------|---|---|-------------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | | |
| | | $n(\text{HO}^-)$ | $n(\text{H}_3\text{O}^+)$ | $n(\text{H}_2\text{O})$ |
| État initial | $x = 0$ | $[\text{HO}^-] \times V_B$ | $[\text{H}_3\text{O}^+] \times V_A$ | Excès |
| État final | $x = x_f$ | $[\text{HO}^-] \times V_B - x_f = 1,00 \times 10^{-4}$ | $[\text{H}_3\text{O}^+] \times V_A - x_f = 0$ | Excès |

On a donc :

$$x_f = [\text{H}_3\text{O}^+] \times V_A = 2,00 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 20,0 \times 10^{-3} \text{ L}$$

$$x_f = 4,00 \times 10^{-3} \text{ mol}.$$

On a aussi :

$$[\text{HO}^-] \times V_B - x_f = 1,00 \times 10^{-4} \Rightarrow [\text{HO}^-] = \frac{1,00 \times 10^{-4} + x_f}{V_B}.$$

Application numérique :

$$[\text{HO}^-] = \frac{1,00 \times 10^{-4} \text{ mol} + 4,00 \times 10^{-3} \text{ mol}}{0,0100 \text{ L}} = 0,410 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

13 Justifier l'évolution de la conductivité

Les ions présents au cours du titrage sont : H_3O^+ , Cl^- , Na^+ et HO^- .

| Ions | Évolution des quantités de matière | |
|------------------------|------------------------------------|-----------|
| | $V < V_E$ | $V > V_E$ |
| H_3O^+ | ↘ | 0 |
| Cl^- | = | = |
| Na^+ | ↗ | ↗ |
| HO^- | 0 | ↗ |

- Avant l'équivalence, la courbe est une droite de pente négative car tout se passe comme si, dans le bécher un ion H_3O^+ fort conducteur est remplacé par un ion sodium Na^+ moins conducteur.
- Après l'équivalence, la courbe est une droite de pente positive car les ions Na^+ et HO^- s'accumulent dans le bécher.

16 Identifier une courbe de conductimétrie

a.

| Ions | Évolution des quantités de matière | |
|-----------------|------------------------------------|-----------|
| | $V < V_E$ | $V > V_E$ |
| NH_4^+ | ↘ | 0 |
| HO^- | 0 | ↗ |
| Na^+ | ↗ | ↗ |

• Avant l'équivalence, tout se passe comme si, dans le bécher un ion NH_4^+ est remplacé par un ion sodium Na^+ . $\lambda(\text{NH}_4^+) > \lambda(\text{Na}^+)$, donc la pente est négative, mais en valeur absolue cette pente est faible.

• Après l'équivalence, la courbe est une droite de pente positive car les ions Na^+ et HO^- s'accumulent dans le bécher.

L'équation (a) est donc associée au graphe (3).

b.

| Ions | Évolution des quantités de matière | |
|----------------------------|------------------------------------|-----------|
| | $V < V_E$ | $V > V_E$ |
| HO^- | 0 | ↗ |
| Na^+ | ↗ | ↗ |
| CH_3CO_2^- | ↗ | → |

• Avant l'équivalence, la courbe est une droite de pente positive car les ions Na^+ et CH_3CO_2^- s'accumulent dans le bécher.

• Après l'équivalence, la courbe est une droite de pente positive car les ions Na^+ et HO^- s'accumulent dans le bécher. Comme HO^- est plus conducteur que CH_3CO_2^- la pente après l'équivalence est plus grande.

L'équation (b) est donc associée au graphe (1).

c.

| Ions | Évolution des quantités de matière | |
|------------------------|------------------------------------|-----------|
| | $V < V_E$ | $V > V_E$ |
| H_3O^+ | ↘ | 0 |
| HO^- | 0 | ↗ |
| Na^+ | ↗ | ↗ |

• Avant l'équivalence, tout se passe comme si, dans le bécher, un ion H_3O^+ est remplacé par un ion sodium Na^+ . $\lambda(\text{H}_3\text{O}^+) \gg \lambda(\text{Na}^+)$, donc la pente est négative.

• Après l'équivalence, la courbe est une droite de pente positive car les ions Na^+ et HO^- s'accumulent dans le bécher.

L'équation (c) est donc associée au graphe (2).

Exercices

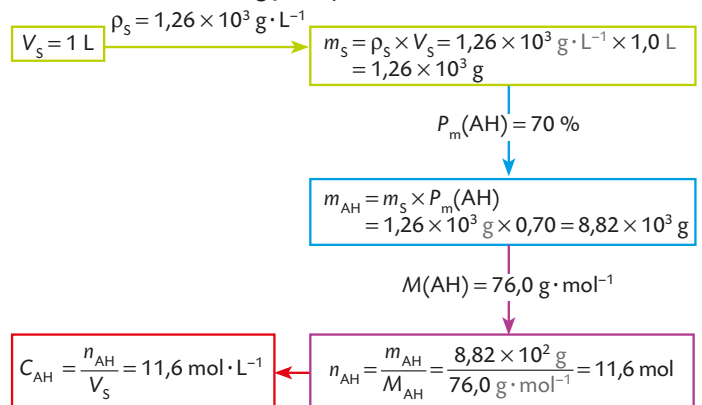
S'entraîner

p. 65

17 Connaître les critères de réussite

Un traitement contre l'acné

Détermination de la concentration en quantité de la solution commerciale S d'acide glycolique AH :



Lors de la dilution, la quantité de matière se conserve :

$$C_S \times V_S = C_f \times V_f \text{ soit } V_S = \frac{C_f \times V_f}{C_S} = 1,3 \text{ mL}.$$

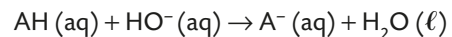
À l'aide d'une pipette graduée de 2 mL préalablement rincée avec la solution d'acide glycolique AH, prélever 1,3 mL de solution d'acide glycolique (ou peser 1,60 g à l'aide d'une balance). Les introduire dans une fiole jaugée de 250 mL et ajuster avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser la solution.

18 À chacun son rythme

Réaliser un contrôle qualité

1. D'après la méthode de la courbe dérivée, le volume versé à l'équivalence V_E est égal à 11,0 mL.

2. L'équation s'écrit :



3. À l'équivalence :

$$\frac{n_0(\text{AH})}{1} = \frac{n_E(\text{HO}^-)}{1}$$

$$\text{donc } \frac{[\text{AH}] \times V_A}{1} = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{1} \Rightarrow [\text{AH}] = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{V_A}.$$

Application numérique :

$$[\text{AH}] = \frac{1,00 \times 10^{-3} \times 11,0}{10,0} = 1,10 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. • La quantité de matière n_0 de AH présente dans le cachet d'aspirine est égale à : $n_0 = [\text{AH}] \times V$.

Application numérique : $n_0 = 1,10 \times 10^{-3} \times 0,500 = 5,50 \times 10^{-4} \text{ mol}.$

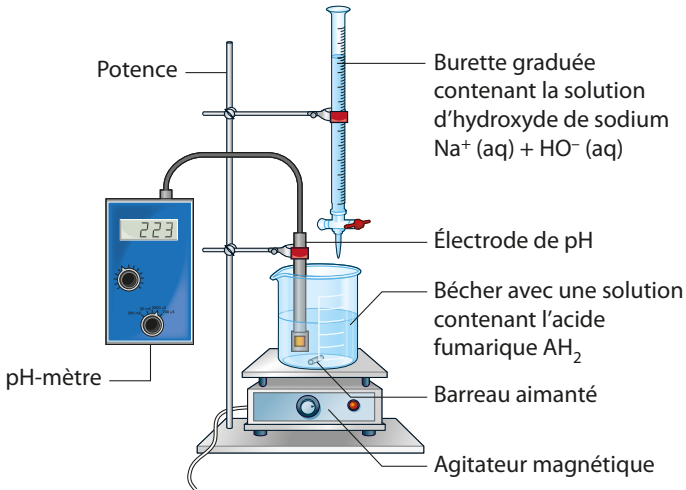
• La masse m de AH présente dans le cachet d'aspirine s'exprime par : $m = n_0 \times M$.

Application numérique : $m = 5,50 \times 10^{-4} \times 180 = 9,90 \times 10^{-2} \text{ g}.$

5. Le fabricant annonce un comprimé contenant 100 mg d'aspirine. Pour que le contrôle qualité soit acceptable, la masse d'aspirine contenue dans le comprimé doit appartenir à l'intervalle [99 mg ; 101 mg]. On obtient une masse $m = 99,0 \text{ mg}$, c'est la limite inférieure acceptable. Le cachet satisfait au contrôle qualité.

19 Contrôle qualité d'un traitement nutritionnel

1.



2. • On détermine à l'aide de la méthode des tangentes le volume V_E versé à l'équivalence, soit $V_E = 8,4$ mL.

• À l'équivalence :

$$\frac{n_0(\text{AH}_2)}{1} = \frac{n_E(\text{HO}^-)}{2}$$

$$\text{donc } \frac{[\text{AH}_2] \times V_A}{1} = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{2} \Rightarrow [\text{AH}_2] = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{2V_A}$$

Application numérique :

$$[\text{AH}_2] = \frac{1,00 \times 10^{-1} \times 8,4}{2 \times 10,0} = 4,20 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

• La quantité de matière n_0 de AH_2 présente dans la gélule est égale à : $n_0 = [\text{AH}_2] \times V$.

Application numérique : $n_0 = 4,20 \times 10^{-2} \times 0,100 = 4,20 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

• La masse m de AH_2 présente dans la gélule d'acide fumarique s'exprime par : $m = n_0 \times M$.

Application numérique :

$$m = 4,20 \times 10^{-2} \times 116 = 4,87 \times 10^{-1} \text{ g} = 487 \text{ mg}$$

3. Les sources d'erreurs possibles sont :

- gélule pas totalement vidée ;
- erreur sur le volume V_A prélevé ;
- erreur sur la concentration de la solution titrante $[\text{HO}^-]$;
- erreur sur la détermination du volume équivalent ;
- erreur sur le volume V de préparation de solution.

$$4. \text{ On a : } m = n_0 \times M = [\text{AH}_2] \times V \times M = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{2V_A} \times V \times M$$

$$\Rightarrow u(m) = m \times \sqrt{\left(\frac{u([\text{HO}^-])}{[\text{HO}^-]}\right)^2 + \left(\frac{u(V_E)}{V_E}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(V_A)}{V_A}\right)^2}$$

L'incertitude-type sur le volume équivalent peut être estimée à 0,1 mL.

Application numérique :

$$u(m) = 487 \times \sqrt{\left(\frac{0,003}{0,100}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{8,4}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{10}\right)^2} = 16 \text{ mg}$$

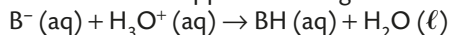
Soit $m \in [471 ; 503]$ mg.

La valeur indiquée par l'étiquette est bien dans l'intervalle.

20 Python

Choix d'une méthode de titrage

1. Équation de la réaction support du titrage :



2. a. Pour $V_A < V_E$: le réactif limitant correspond aux ions oxonium H_3O^+ , donc $x_f = C_A \times V_A$.

| Équation de la réaction | | $\text{B}^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) \rightarrow \text{BH} (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell)$ | | | |
|-------------------------|-------------------|---|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | | | |
| | | $n(\text{B}^-)$ | $n(\text{H}_3\text{O}^+)$ | $n(\text{BH})$ | $n(\text{H}_2\text{O})$ |
| État initial | $x = 0$ | $C_B \times V_0$ | $C_A \times V_A$ | 0 | Excès |
| État final | $x = x_f$ | $C_B \times V_0 - C_A \times V_A$ | 0 | $x_f = C_A \times V_A$ | Excès |

b. Pour $V_A > V_E$: le réactif limitant correspond aux ions benzoate B^- , donc $x_f = C_B \times V_0$.

| Équation de la réaction | | $\text{B}^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) \rightarrow \text{BH} (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell)$ | | | |
|-------------------------|-------------------|---|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | | | |
| | | $n(\text{B}^-)$ | $n(\text{H}_3\text{O}^+)$ | $n(\text{BH})$ | $n(\text{H}_2\text{O})$ |
| État initial | $x = 0$ | $C_B \times V_0$ | $C_A \times V_A$ | 0 | Excès |
| État final | $x = x_f$ | 0 | $C_A \times V_A - C_B \times V_0$ | $x_f = C_B \times V_0$ | Excès |

3. Pour chaque pas de volume $V_A < V_E$, on ajoute aux listes d'après le tableau d'avancement.

Pour la concentration CB de B^- :

$$(C_B \times V_0 - C_A \times V_A) / (V_0 + V_A) \text{ (ligne 10)}$$

Pour la concentration CBH de BH :

$$C_A \times V_A / (V_0 + V_A) \text{ (ligne 11)}$$

Pour le pH (ligne 12), on utilise le complément scientifique, $\text{pH} = 4,2 + \log([\text{B}^-]/[\text{BH}])$ soit ajout du terme : $4,2 + \log[(C_B \times V_0 - C_A \times V_A) / (C_A \times V_A)]$.

4.

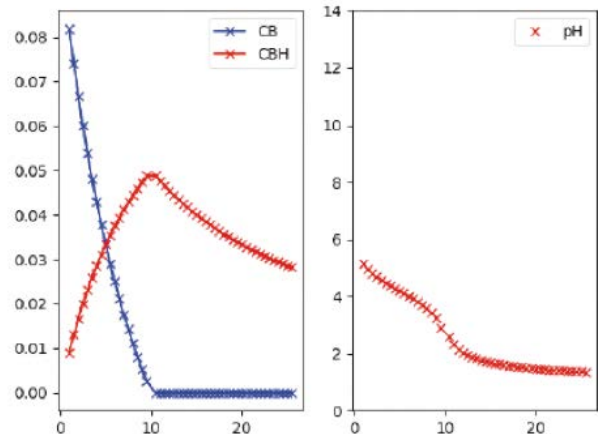
Ressources numériques : fichiers Python, version pour l'élève et version complète pour le professeur

On complète le programme pour $V_A > V_E$:

```
V. append(VA)
CB. append(0)
CBH. append((CBi*V0)/(V0+VA))
CH. append((CA*VA-CBi*V0)/(V0+VA))
pH. append(-log10((CA*VA-CBi*V0)/(V0+VA)))
```

5. Avant l'équivalence, le benzoate B^- est consommé, donc sa concentration diminue jusqu'à devenir nulle à partir de l'équivalence. Parallèlement, avant l'équivalence, l'acide benzoïque se forme, sa concentration augmente.

Après l'équivalence, la quantité d'acide benzoïque reste constante, mais le volume de la solution augmente par ajout du réactif titrant. La concentration de l'acide benzoïque diminue du fait de la dilution.



6. La courbe de titrage par suivi pH-métrique montre un saut peu important. L'exploitation du titrage par pH-métrie semble donc difficile.

7. Les ions présents au cours du titrage sont : Na^+ , B^- , H_3O^+ et Cl^- .

| Ions | Évolution des quantités de matière | |
|------------------------|------------------------------------|-----------|
| | $V < V_E$ | $V > V_E$ |
| B^- | ↘ | 0 |
| Na^+ | = | = |
| Cl^- | ↗ | ↗ |
| H_3O^+ | 0 | ↗ |

• Avant l'équivalence, la courbe est une droite de pente positive car tout se passe comme si, dans le bécher un ion B^- est remplacé par un ion chlorure Cl^- plus conducteur.

• Après l'équivalence, la courbe est une droite de pente positive car les ions H_3O^+ et Cl^- s'accumulent dans le bécher.

8. Le titrage suivi par conductimétrie semble le plus adapté au dosage des ions benzoate car le volume V_E versé à l'équivalence est plus facilement repérable.

21 Résolution de problème CORRIÉ Algues et alimentation

1^{re} étape : Bien comprendre la question posée

1. L'élément iode I est apporté par les algues Kombu.
2. Le dosage suivi par conductimétrie permet la détermination de la masse d'élément iode contenu dans 50 g d'algue Kombu.

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. Les ions iodures I^- (aq) sont titrés par les ions plomb (II) Pb^{2+} (aq).
2. La courbe peut être modélisée par deux segments de droite de pentes différentes.
3. L'intersection des deux segments de droite permet de déterminer le volume versé à l'équivalence.
4. La solution S est préparée à partir de 50 g d'algue, un volume de 100,0 mL est obtenu.
5. La prise d'essai est égale à 50,0 mL.
6. Un adolescent doit consommer 150 μg d'élément iode pour satisfaire ses besoins énergétiques.

3^e étape : Dégager la problématique

Déterminer la masse d'élément iode dans 50 g puis en déduire la masse nécessaire pour couvrir les apports journaliers d'un adolescent.

4^e étape : Construire la réponse

- Déterminer le volume versé à l'équivalence.
- Écrire la relation à l'équivalence.
- En déduire la concentration en élément iode dans la solution S.
- Calculer la masse d'élément iode contenu dans 50 g d'algue Kombu.
- En déduire la masse d'algue nécessaire pour apporter 150 μg d'élément iode I.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

• Présenter le contexte et introduire la problématique.
L'élément iode I, essentiel au fonctionnement du corps humain, est apporté par l'alimentation. Les algues Kombu contiennent l'élément iode. Quelle masse d'algue un adolescent doit-il consommer tous les jours pour satisfaire ses besoins journaliers soit 150 μg ?

- Mettre en forme la réponse.
- Déterminer la concentration C_I en ions iodure I^- :
Les segments de droite moyenne sont tracés. À l'intersection, le volume versé à l'équivalence est lu : $V_E = 10,0 \text{ mL}$.

À l'équivalence : $\frac{n(\text{I}^-)}{2} = n(\text{Pb}^{2+})$ soit $C_I \times \frac{V}{2} = C_{\text{Pb}} \times V_E$;

soit $C_I = 2C_{\text{Pb}} \times \frac{V_E}{V} = 2,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

- Déterminer la masse m_I d'iode dans 50 g d'algues :
 $m_I = C_I \times V_S \times M(\text{I}) = 2,00 \times 10^{-2} \times 0,100 \times 126,9 = 0,254 \text{ g}$.
- Déterminer la masse m journalière d'algues consommables :
Par jour, un adolescent doit consommer pour un apport nutritionnel recommandé 150 μg soit :

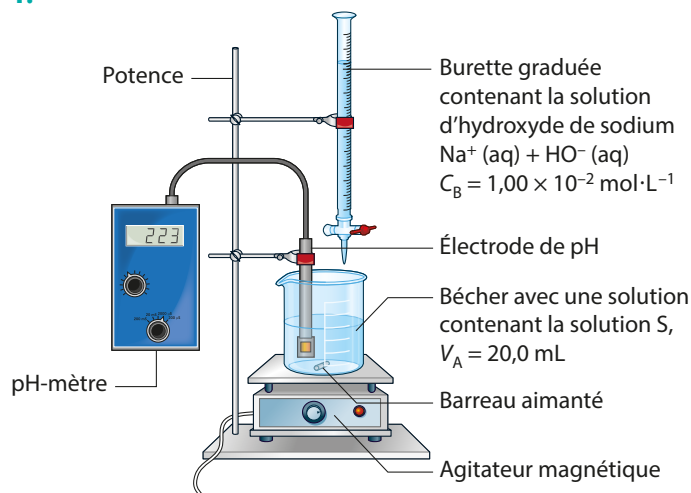
$$m = \frac{50 \times 150 \times 10^{-6}}{0,254} = 30 \text{ mg}.$$

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

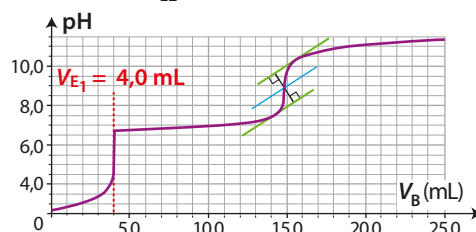
La masse d'algue à consommer est très faible. Il faut donc prendre garde à ne pas dépasser l'apport maximal soit $30 \times \left(\frac{900}{150}\right) = 180 \text{ mg}$ d'algue.

22 Dépollution par des végétaux

1.



2. À l'aide de la méthode des tangentes, on détermine le volume versé à l'équivalence : $V_{E2} = 15,0 \text{ mL}$.



3. • Pour $V < V_{E1}$, seuls les ions hydronium H_3O^+ sont titrés.
- Pour $V_{E1} < V < V_{E2}$: seuls les ions Ni^{2+} sont titrés.

À l'équivalence 2 :

$$\frac{n_0(\text{Ni}^{2+})}{1} = \frac{n(\text{HO}^-)_{\text{versé entre } V_{E1} \text{ et } V_{E2}}}{2} \Rightarrow n_{\text{Ni}^{2+}} = \frac{C_B \times (V_{E2} - V_{E1})}{2}$$

Application numérique :

$$n_{\text{Ni}^{2+}} = \frac{1,00 \times 10^{-2} \times (15,0 - 4,0) \times 10^{-3}}{2} = 5,50 \times 10^{-5} \text{ mol}.$$

4. On en déduit que dans la solution S : $[\text{Ni}^{2+}] = \frac{n_{\text{Ni}^{2+}}}{V_A}$

$$\text{soit } [\text{Ni}^{2+}] = \frac{5,50 \times 10^{-5} \text{ mol}}{0,0200 \text{ mL}} = 2,75 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

- Donc la quantité $n_{\text{Ni},20\text{g}}$ d'élément nickel Ni présente dans 20,0 g de *Festuca Lemanii* est égal à :

$$n_{\text{Ni},20\text{g}} = [\text{Ni}^{2+}] \times V_S = 2,75 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 50,0 \times 10^{-3} \text{ L} = 1,38 \times 10^{-4} \text{ mol}.$$

- Aussi la quantité $n_{\text{Ni},1\text{g}}$ d'élément nickel Ni présente dans 1,0 g de *Festuca Lemanii* est égal à :

$$n_{\text{Ni},1\text{g}} = \frac{n_{\text{Ni},20\text{g}}}{20} = 6,87 \times 10^{-6} \text{ mol}.$$

- La masse de nickel présent dans 1 g de *Festuca Lemannii* est donc :

$$m_{\text{Ni},1\text{g}} = n_{\text{Ni},1\text{g}} \times M(\text{Ni}),$$

$$\text{soit } m_{\text{Ni},1\text{g}} = 6,87 \times 10^{-6} \text{ mol} \times 58,7 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 404 \mu\text{g}.$$

5. Il est envisageable d'utiliser la *Festuca Lemanii* qui a besoin de beaucoup plus de nickel que les végétaux usuels. Ainsi, la *Festuca Lemanii* pourrait capter l'élément nickel du sol et serait susceptible de dépolluer le sol en élément nickel.

23 La gare de Limoges

Erratum : erreur dans le spécimen corrigée dans le manuel de l'élève : le volume V_A est égal à 10,0 mL et non 100,0 mL

1. On dresse un tableau traduisant l'évolution des quantités de matière.

| Ions | Évolution des quantités de matière | | |
|-----------|------------------------------------|-----------------------|--------------|
| | $V < V_{E1}$ | $V_{E1} < V < V_{E2}$ | $V > V_{E2}$ |
| H_3O^+ | ↘ | 0 | 0 |
| HO^- | 0 | 0 | ↗ |
| Na^+ | ↗ | ↗ | ↗ |
| Cu^{2+} | ↘ | ↘ | 0 |

• Pour $V < V_{E1}$, tout se passe comme si, dans le bécher un ion H_3O^+ très conducteur est remplacé par un ion sodium Na^+ moins conducteur. La pente du segment est donc négative.

• Pour $V_{E1} < V < V_{E2}$, tout se passe comme si, dans le bécher un ion cuivre (II) Cu^{2+} est remplacé par deux ions sodium Na^+ . Comme $+2\lambda(Na^+) - \lambda(Cu^{2+}) = -1 \text{ mS} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{m}^2$, la pente est négative mais le segment de droite décroît peu.

• Pour $V > V_{E2}$, les ions Na^+ et HO^- s'accumulent dans le bécher. Le segment de droite présente une pente positive.

2. Pour $V_{E1} < V < V_{E2}$: seuls les ions Cu^{2+} réagissent.

On a :

$$\frac{n_0(Cu^{2+})}{1} = \frac{n_{\text{versé entre } V_{E1} \text{ et } V_{E2}}}{2} \Rightarrow n(Cu) = \frac{C_B \times (V_{E2} - V_{E1})}{2}$$

$$3. \text{ On a } n(Cu) = \frac{2,00 \times 10^{-1} \times (13,3 - 2,0) \times 10^{-3}}{2}$$

$$n(Cu) = 1,13 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

• Dans 10 mL, la masse m d'élément cuivre dans l'échantillon est donc :

$$m = n(Cu) \times M(Cu) = 1,13 \times 10^{-3} \times 63,5 = 71,8 \text{ mg.}$$

• Dans 1,0 L, la masse m_{Cu} d'élément cuivre dans l'échantillon est donc : $m_{Cu} = 100 \times m = 1,13 \times 10^{-3} \times 63,5 = 7,18 \text{ g.}$

4. a. Lors de la réparation du dôme de la gare de Limoges, le matériau était composé uniquement de cuivre. Un échantillon de surface A et d'épaisseur $e = 8,0 \times 10^{-1} \text{ cm}$ pesait une masse correspondant à la masse m_{Cu} .

b. Aujourd'hui, cet échantillon s'est en partie oxydé et pèse : m_0 . On a : $\Delta m = m_0 - m_{Cu} = 7,22 - 7,18 = 0,04 \text{ g.}$

La variation de masse Δm est positive.

En effet, lorsque le cuivre s'oxyde et donne une couche de vert de gris, la masse de l'élément cuivre se conserve mais s'ajoutent d'autres éléments : pour une mole de vert de gris formé, s'ont ajoutés à l'élément cuivre : deux moles de OH et 1 mole de CO_3 soit $\Delta m > 0$.

5. On a pour une quantité de vert de gris n_{vdg} :

$$\Delta m = n_{vdg} \times (2M(OH) + M(CO_3)) = n_{vdg} \times (2M(H) + M(C) + 5M(O))$$

$$6. \text{ On a : } n_{vdg} = \frac{\Delta m}{2M(H) + M(C) + 5M(O)} = \frac{0,04}{2 + 12 + 5 \times 16} = 4,3 \times 10^{-4} \text{ mol.}$$

7. Le volume de vert de gris vaut : $V = A \times e'$.

$$\rho_{vdG} = \frac{m_{vdG}}{V_{vdG}} = \frac{n_{vdG} \times M_{vdG}}{A \times e'}$$

$$= \frac{n_{vdG} \times (2M(Cu) + 2M(H) + M(C) + 5M(O))}{A \times e'}$$

$$\Rightarrow e' = \frac{n_{vdG} \times (2M(Cu) + 2M(H) + M(C) + 5M(O))}{A \times \rho_{vdG}}$$

$$\text{soit } e' = \frac{4,3 \times 10^{-4} \text{ mol} \times (2 \times 63,5 + 2 \times 1 + 12 + 5 \times 16) \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{1,00 \text{ cm}^2 \times 4,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}$$

$$e' = 2,4 \times 10^{-2} \text{ cm.}$$

8. La corrosion du dôme de la gare de Limoges est achevée si 5 % de la couche s'est oxydée en vert de gris soit une épaisseur de 0,04 cm. D'après la question 7, la couche de vert de gris mesure 0,024 cm donc l'oxydation n'est pas totalement terminée. La coloration du dôme de la plus belle gare de France devrait donc encore évoluer.

Vers le Bac

Préparation à l'écrit

24 Traitement d'un effluent

1. Détermination de la concentration en quantité de la solution commerciale S d'acide chlorhydrique :

$$V_s = 1 \text{ L} \quad \rho_s = 1,15 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \quad m_s = \rho_s \times V_s = 1,15 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \times 1,0 \text{ L} = 1,15 \times 10^3 \text{ g}$$

$$P_m(\text{HCl}) = 32\%$$

$$m_{\text{HCl}} = m_s \times P_m(\text{HCl}) = 1,15 \times 10^3 \text{ g} \times 0,32 = 3,68 \times 10^2 \text{ g}$$

$$M(\text{HCl}) = 36,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$n_{\text{HCl}} = \frac{m_{\text{HCl}}}{M_{\text{HCl}}} = \frac{3,68 \times 10^2 \text{ g}}{36,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 10,0 \text{ mol}$$

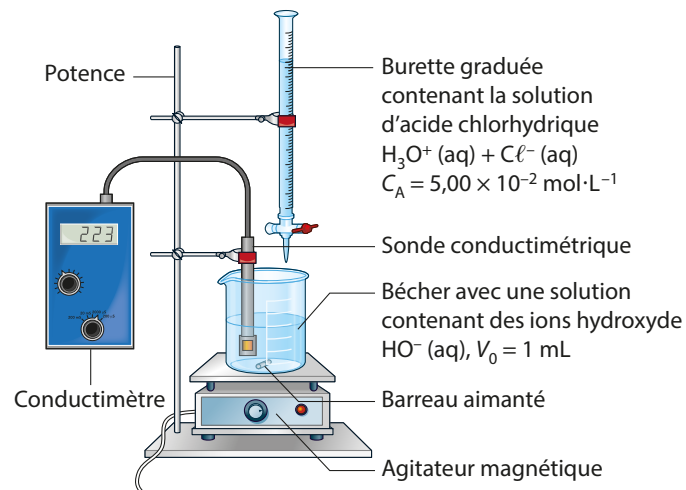
$$C_{\text{HCl}} = \frac{n_{\text{HCl}}}{V_s} = 10,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Lors de la dilution, la quantité de matière se conserve :

$$C_s \times V_s = C_A \times V_A \text{ soit } V_s = \frac{C_A \times V_A}{C_s} = 1,0 \text{ mL.}$$

Protocole : À l'aide d'une pipette jaugée de 1,0 mL, prélever 1,0 mL de solution d'acide chlorhydrique et les verser dans une fiole jaugée de 200 mL. Ajouter de l'eau distillée, homogénéiser. Ajuster avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser la solution.

2.



3. Les ions présents au cours du titrage sont : Na^+ , HO^- , H_3O^+ et Cl^- .

| Ions | Évolution des quantités de matière | |
|------------------------|------------------------------------|-----------|
| | $V < V_E$ | $V > V_E$ |
| HO^- | ↘ | 0 |
| Na^+ | = | = |
| Cl^- | ↗ | ↗ |
| H_3O^+ | 0 | ↗ |

• Avant l'équivalence, la courbe est une droite de pente négative car tout se passe comme si, dans le bécher un ion HO^- fort conducteur est remplacé par un ion chlorure Cl^- moins conducteur.

• Après l'équivalence, la courbe est une droite de pente positive car les ions Cl^- et H_3O^+ s'accumulent dans le bécher.

4. Les segments de droite moyenne sont tracés. À l'intersection, le volume versé à l'équivalence est lu : $V_E = 13,0 \text{ mL}$.

• Détermination de la concentration C_B en ions HO^- de l'effluent : À l'équivalence : $n(\text{HO}^-) = n(\text{H}_3\text{O}^+)$ soit :

$$C_B \times V_0 = C_A \times V_E \text{ et } C_B = C_A \times \frac{V_E}{V_0} = 6,5 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Le pH est alors égal à : $14 + \log(6,5 \times 10^{-1}) = 13,8$ largement supérieur à la norme.

Par ailleurs, la concentration en ions sodium est telle que : $[\text{Na}^+] = [\text{HO}^-] = 6,5 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. La concentration en ions sodium dépasse également la norme.

5. Si les ions hydroxydes HO^- sont limitants, alors $x_f = C_B \times V_{\text{eff}}$

| Équation de la réaction | | $\text{HO}^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (\ell)$ | | |
|-------------------------|-------------------|--|--|-------------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | | |
| | | $n(\text{HO}^-)$ | $n(\text{H}_3\text{O}^+)$ | $n(\text{H}_2\text{O})$ |
| État initial | $x = 0$ | $C_B \times V_{\text{eff}}$ | $C \times V$ | Excès |
| État final | $x = x_f$ | 0 | $C \times V - C_B \times V_{\text{eff}}$ | Excès |

6.

Ressource numérique à télécharger : fichier Python

L'instruction ligne 6 permet de calculer la quantité d'ions hydroxyde $\text{HO}^- (\text{aq})$ présents dans l'effluent. D'après le titrage : $C_B = C_A \times \frac{V_E}{V_0}$.

La quantité d'ions hydroxyde est égale à :

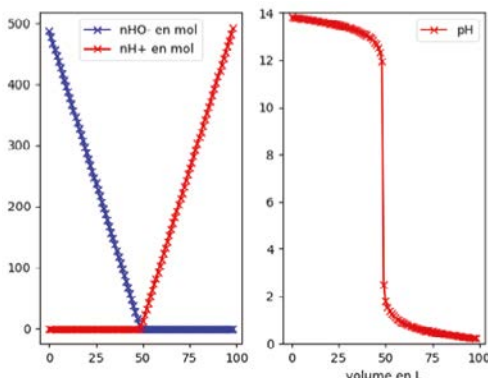
$$V_{\text{eff}} \times C_B \text{ soit } V_{\text{eff}} \times \left(C_A \times \frac{V_E}{V_0} \right) = V_{\text{eff}} \times \left(0,05 \times \frac{V_E}{0,001} \right).$$

7. • Lors des instructions lignes [23,27], le réactif limitant correspond aux ions hydronium $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$ car la quantité d'ions hydroxyde $\text{HO}^- (\text{aq})$ est positive à l'état final.

• Lors des instructions lignes [28,32], le réactif limitant correspond aux ions hydroxyde $\text{HO}^- (\text{aq})$ car la quantité d'ions hydronium H_3O^+ est positive à l'état final.

• Les instructions lignes [33,37] donnent le mélange stœchiométrique.

8. On réalise la simulation. Pour avoir $5 \leq \text{pH} \leq 8$, il faut verser environ $V = 50 \text{ L}$ d'acide chlorhydrique.



9. La concentration en ions sodium $\text{Na}^+ (\text{aq})$ sera toujours trop importante. L'entreprise devra donc diluer l'effluent pour diminuer la concentration en ions sodium $\text{Na}^+ (\text{aq})$.

2.5 Lutter contre le tartre

1. Par la méthode des dérivés, on détermine le volume versé à l'équivalence ; V_E est égal à $12,0 \text{ mL}$.

À l'équivalence : $n(\text{H}_3\text{O}^+) = n(\text{HO}^-)$, soit :

$$C_S(\text{H}_3\text{O}^+) \times V_S = C_B \times V_E \text{ et } C_S(\text{H}_3\text{O}^+) = C_B \times \frac{V_E}{V_S} = 1,2 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

La concentration C_a en ions H_3O^+ du détartrant est donc :

$$C_a = 20 \times C_S(\text{H}_3\text{O}^+) = 2,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

2. • Évaluation du volume de tartre :

$$V_{\text{tartre}} = e_{\text{tartre}} \times S_{\text{tartre}} \text{ avec } S_{\text{tartre}} = 2\pi R^2 + 2\pi R h$$

$$\text{soit } V_{\text{tartre}} = 2,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3.$$

• Détermination de la quantité de carbonate de sodium $n(\text{CaCO}_3)$:

$$n(\text{CaCO}_3) = \frac{m(\text{CaCO}_3)}{M(\text{CaCO}_3)} = \frac{\rho V_{\text{tartre}}}{M(\text{CaCO}_3)} = 0,53 \text{ mol}.$$

• Détermination de la quantité d'ions hydronium H_3O^+ nécessaire :

$$\text{À l'équivalence : } \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)}{2} = n(\text{CaCO}_3)$$

$$\text{soit } n(\text{H}_3\text{O}^+) = 2 \times n(\text{CaCO}_3) = 1,1 \text{ mol}.$$

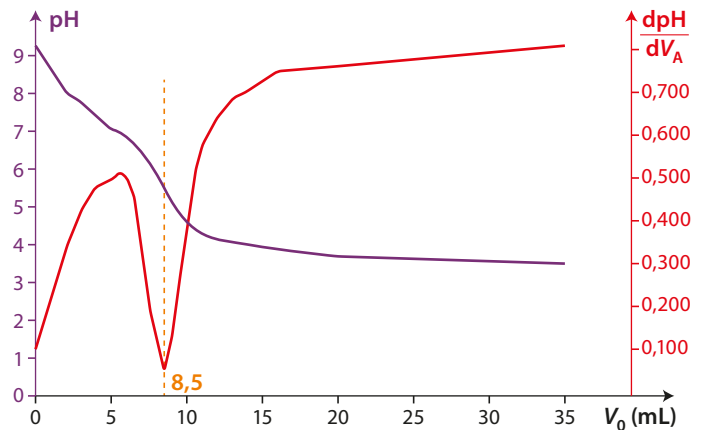
• Détermination du volume V_0 de détartrant à utiliser :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = C_a \times V_0 \text{ soit } V_0 = \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)}{C_a} = 441 \text{ mL};$$

donc $V_0 < 750 \text{ mL}$, le flacon est suffisant pour détartrer totalement tout le tambour.

Préparation à l'ECE

1. On trace la courbe $\text{pH} = f(V_A)$, par la méthode de la dérivée, on détermine le volume équivalent $V_E = 8,5 \text{ mL}$.



À l'équivalence $n(\text{HCO}_3^-) = n(\text{H}_3\text{O}^+)$

$$\text{soit } n(\text{HCO}_3^-) = C_A \times V_E = 5,00 \times 10^{-3} \times 8,5 \times 10^{-3} = 4,3 \times 10^{-5} \text{ mol}.$$

La quantité d'ions hydrogencarbonate contenue dans la pastille est égale à $4,3 \times 10^{-5} \text{ mol}$.

2. Quelques exemples de sources d'erreur :

- pertes de matière lors du transvasement du mortier au bécher ;
- lecture des volumes de solution d'acide versée ;
- détermination du volume équivalent.

3. La quantité d'ions sodium contenue dans une pastille est égale à : $n(\text{Na}^+) = n(\text{HCO}_3^-) = 4,3 \times 10^{-5} \text{ mol}$ et donc la masse de sodium est égale à :

$$m(\text{Na}) = n(\text{Na}^+) \times M(\text{Na}) = 9,8 \times 10^{-4} \text{ g}.$$

Pour la consommation de trois pastilles, la masse la masse de sodium est égale à $2,9 \times 10^{-3} \text{ g} \approx 3 \text{ mg}$. Quelque soit le régime hyposodé, il est possible de consommer une pastille après chaque repas.

Sujet complet fourni dans la version numérique :

Une pastille du bassin de Vichy est un bonbon plat de couleur blanche et de masse m_0 voisine de 2,9 g. Elle est fabriquée à partir de sels minéraux provenant du bassin de Vichy. Elle est supposée avoir des propriétés digestives grâce à l'apport l'hydrogénécarbonate de sodium, NaHCO_3 (s).

Le but de cette épreuve est de déterminer si la consommation quotidienne de pastilles Vichy est adaptée à un régime hyposodé.

A Régime hyposodé

En raison de problèmes cardiaques ou d'hypertension, un régime hyposodé (pauvre en élément sodium Na) peut être prescrit. La masse m_{max} quotidienne maximale d'élément sodium ingérée dépend du régime :

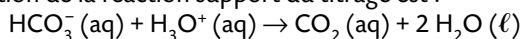
- régime hyposodé strict : $m_{\text{max}} \leq 500$ mg ;
- régime hyposodé standard : $m_{\text{max}} \leq 1\,000$ mg ;
- régime hyposodé large : $m_{\text{max}} \leq 2\,000$ mg.

B Méthode de titrage

• Une pastille du bassin de Vichy, réduite en poudre, est introduite dans un bécher de 100 mL. Un volume de 50 mL d'eau distillée est ajouté.

• Le titrage suivi par pH-métrie de cette solution est réalisé avec une solution de concentration $C_A = 5,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en acide chlorhydrique.

L'équation de la réaction support du titrage est :



Matériel mis à disposition :

- Une pastille Vichy dont la masse est indiquée.
- Une pissette d'eau distillée.
- Un flacon étiqueté « solution aqueuse d'acide chlorhydrique » contenant 100 mL d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique de concentration $C_A = 5,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Une paire de gants.
- Une paire de lunettes.
- Un bécher de 100 mL.
- Deux béchers de 50 mL.
- Un mortier et un pilon.
- Une éprouvette graduée de 50 mL.
- Un agitateur magnétique.
- Un barreau aimanté.
- Une coupelle de pesée.
- Une burette graduée de 25,0 mL.

- Un pH-mètre étalonné.
- Un support pour électrode.
- Un ordinateur relié à une imprimante avec un tableur-grapheur installé.

Données

$$M(\text{NaHCO}_3) = 84,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} ; M(\text{Na}) = 23,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

1. ANA - RAIS Schéma du dispositif expérimental (10 min)

Proposer le schéma d'un dispositif expérimental, détaillé et légendé, permettant d'effectuer le titrage pH-métrique des ions hydrogénécarbonate HCO_3^- contenus dans une pastille Vichy en utilisant la solution aqueuse d'acide chlorhydrique mise à disposition (doc. B).

APPEL n° 1

Appeler le professeur pour lui présenter le schéma expérimental ou en cas de difficulté.

2. RÉA Mise en œuvre du protocole expérimental (25 min)

- Broyer la pastille Vichy et introduire le broyat dans un bécher de 100 mL.
- À l'aide d'environ 50 mL d'eau distillée, rincer le mortier et introduire les eaux de rinçage dans le bécher de 100 mL.
- Mettre en œuvre le dispositif schématisé précédemment pour titrer la solution aqueuse préparée.
- Tracer, à l'aide de l'outil informatique, le graphique représentant le pH de la solution en fonction du volume de solution titrante versé.

APPEL n° 2

Appeler le professeur pour lui présenter la courbe représentant le pH en fonction du volume de base ajouté ou en cas de difficulté.

3. Réponses à la problématique (25 min)

a. RÉA Exploiter les mesures du titrage pour déterminer la quantité d'ions hydrogénécarbonate HCO_3^- dans une pastille Vichy.

APPEL FACULTATIF

Appeler le professeur.

b. VAL Identifier deux sources d'erreurs pouvant être commises dans la détermination de la quantité d'ions hydrogénécarbonate contenu dans une pastille.

c. VAL La consommation d'une pastille après chaque repas d'une journée est-elle compatible avec un régime hyposodé ? Justifier.

Défaire le montage et ranger la pailasse avant de quitter la salle.

Vers l'oral

À deux, c'est mieux

Évaluation orale n° 1 :

• L'objectif du titrage est de vérifier la concentration des ions hydrogénécarbonate dans l'eau d'Hépar.

• À l'équivalence : $n(\text{HCO}_3^-) = n(\text{HO}^-)$, soit $[\text{HCO}_3^-] = \frac{[\text{HO}^-] \times V_E}{V_0}$.

Application numérique :

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{5,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 12,2 \text{ mL}}{10,0 \text{ mL}} = 6,10 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$C_m(\text{HCO}_3^-) = M \times [\text{HCO}_3^-] = 6,10 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 61,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 372 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}.$$

L'écart relatif entre les concentrations est de 3 %.

• Pour conclure, la concentration massique en ions hydrogénécarbonate a été vérifiée à 3 % près.

Épreuve orale n° 2 :

• L'objectif du titrage est de vérifier la concentration des ions sulfate dans l'eau Hépar.

• À l'équivalence : $n(\text{SO}_4^{2-}) = n(\text{Ba}^{2+})$, soit $[\text{SO}_4^{2-}] = \frac{[\text{Ba}^{2+}] \times V_E}{V_0}$.

Application numérique :

$$[\text{SO}_4^{2-}] = \frac{1,50 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 10,6 \text{ mL}}{10,0 \text{ mL}} = 1,59 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$C_m(\text{SO}_4^{2-}) = M \times [\text{SO}_4^{2-}] = 1,59 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 96,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 1,53 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}.$$

• Pour conclure, la concentration massique en ions sulfate est vérifiée.

p. 70

Les dosages

- **Définir l'équivalence.**

À l'équivalence, les réactifs ont été placés dans les proportions stœchiométriques.

- **Nommer la grandeur mesurée lors d'un titrage suivi par conductimétrie. Préciser l'unité.**

La grandeur mesurée lors d'un titrage suivi par conductimétrie est la conductivité. Son unité est le siemens par mètre ($S \cdot m^{-1}$).

- **Indiquer les variations des quantités des réactifs titré et titrant dans le bécher au cours du dosage.**

Au cours du titrage, la quantité de réactif titré diminue jusqu'à s'annuler à l'équivalence. La quantité du réactif titrant est nulle jusqu'à épuisement du réactif titré, puis, à partir de l'équivalence, elle augmente car le réactif titrant s'accumule.

- **Comment déterminer l'équivalence d'un titrage suivi par pH-métrie ?**

Pour déterminer l'équivalence d'un titrage suivi par pH-métrie, deux méthodes sont possibles : la méthode des tangentes et la méthode de la courbe dérivée.

4

Modélisation macroscopique de l'évolution d'un système

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 2. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation | |
|--|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| A) Suivre et modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation chimique | |
| Suivi temporel et modélisation macroscopique Transformations lentes et rapides. Facteurs cinétiques : température, concentration des réactifs. Catalyse, catalyseur. | Justifier le choix d'un capteur de suivi temporel de l'évolution d'un système. Identifier, à partir de données expérimentales, des facteurs cinétiques. Citer les propriétés d'un catalyseur et identifier un catalyseur à partir de données expérimentales. <i>Mettre en évidence des facteurs cinétiques et l'effet d'un catalyseur.</i> |
| Vitesse volumique de disparition d'un réactif et d'apparition d'un produit. Temps de demi-réaction. | À partir de données expérimentales, déterminer une vitesse volumique de disparition d'un réactif, une vitesse volumique d'apparition d'un produit ou un temps de demi-réaction. <i>Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration et déterminer la vitesse volumique de formation d'un produit ou de disparition d'un réactif.</i> |
| Loi de vitesse d'ordre 1. | Identifier, à partir de données expérimentales, si l'évolution d'une concentration suit ou non une loi de vitesse d'ordre 1. Capacité numérique : À l'aide d'un langage de programmation et à partir de données expérimentales, tracer l'évolution temporelle d'une concentration, d'une vitesse volumique d'apparition ou de disparition et tester une relation donnée entre la vitesse volumique de disparition et la concentration d'un réactif. |

Liens avec les programmes officiels du cycle 4, de seconde et de première

| | Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|----------------------|--|--|---|
| SECONDE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Espèce chimique. • Solvant, soluté. • Masse, volume, masse volumique. • Mélanges homogènes et hétérogènes. • Quantités de matière. • Concentration en masse. • Transformation chimique, réaction chimique, équation. • Espèce spectatrice, stœchiométrie, réactif limitant. • Vitesse moyenne d'un point. • Lumière blanche, lumière colorée, spectres d'émission. • Capteurs électriques. | <ul style="list-style-type: none"> • Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – la quantité de matière d'une espèce ; – la valeur d'une concentration en masse. • Établir l'équation de réaction associée et l'ajuster. • Citer des exemples : <ul style="list-style-type: none"> – de corps purs et de mélanges homogènes et hétérogènes ; – de capteurs. • Mesurer une grandeur physique à l'aide d'un capteur. | <ul style="list-style-type: none"> • $\rho = \frac{m}{V}$; $t = \frac{m}{V}$ • Équation chimique. • $v = \frac{MM'}{\Delta t}$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Entités chimiques : molécules, atomes, ions. • Nombre d'entités. • Acidité due à la présence d'ions H⁺. | Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – la masse d'une entité à partir de sa formule brute et de la masse des atomes qui la composent ; – le nombre d'entités et la quantité de matière (en mol) d'une espèce dans une masse d'échantillon. | <ul style="list-style-type: none"> • $N = \frac{m}{m_{\text{entité}}}$ • $n = \frac{N}{N_A}$ |

| PREMIÈRE | | | |
|---------------|---|--|---|
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Espèce chimique. • Masse volumique, pression, température, masse molaire, volume molaire d'un gaz. • Concentration en quantité de matière. • Transformation modélisée par une réaction d'oxydoréduction. • Évolution des quantités de matière lors d'une transformation. • Absorbance, spectre d'absorption, couleur d'une espèce en solution, loi de Beer-Lambert. • Titrage avec suivi colorimétrique. | <ul style="list-style-type: none"> • Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – la quantité de matière, la masse, la masse molaire, le volume d'une espèce ; – la concentration en quantité de matière. • Établir une équation de la réaction entre un oxydant et un réducteur. • Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – le réactif limitant ; – la composition d'un système dans l'état final. • Déterminer la concentration d'un soluté à partir de données expérimentales relatives à l'absorbance. | $n = \frac{m}{M} ;$ $n = \frac{V}{V_m}$ <ul style="list-style-type: none"> • $C = \frac{n}{V}$ • Équation d'oxydo-réduction, demi-équation électronique. • $v_i = \frac{M_i M_{i+1}}{t_{i+1} - t_i}$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Entités chimiques : molécules, atomes, ions. • Transfert d'électrons. | Identifier le transfert d'électrons entre deux réactifs. | |
| TERMINALE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Masse volumique, température, pression, titre massique, densité. • Facteurs cinétiques : température, concentration des réactifs. • Catalyse, catalyseur. • Équation d'état du gaz parfait. • Vitesse volumique de disparition d'un réactif et d'apparition d'un produit, temps de demi-réaction. • Loi de vitesse d'ordre 1. • Absorbance ; loi de Beer-Lambert. • Conductance, conductivité ; loi de Kohlrausch. • Acide, base, pH. | <ul style="list-style-type: none"> • Exploiter l'équation d'état du gaz parfait. • Exploiter la loi de Beer-Lambert, la loi de Kohlrausch ou l'équation d'état du gaz parfait pour déterminer une concentration ou une quantité de matière. • Établir l'équation d'une réaction acide-base. • Mesurer le pH de solutions. • Justifier le choix d'un capteur de suivi temporel de l'évolution d'un système. | <ul style="list-style-type: none"> • Modèle du gaz parfait. • $v_{\text{app}}(P)_t = \frac{d[P]}{dt}$ $v_{\text{disp}}(R)_t = -\frac{d[R]}{dt}$ $v_{\text{disp}}(A)_t = k_1[A]_t$ $v_{\text{app}}(C)_t = k_2[A]_t$ $[A]_t = [A]_0 \times \exp(-k \times t)$ • $\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ}\right)$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Entités chimiques : molécules, atomes, ions. • Mécanisme réactionnel : acte élémentaire, intermédiaire réactionnel. • Transferts d'ion hydrogène H⁺. | <ul style="list-style-type: none"> • Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. • Interpréter la vitesse d'un acte élémentaire en fonction de la fréquence et de l'efficacité des chocs entre entités. | <ul style="list-style-type: none"> • Chocs entre entités. • Formalisme de la flèche courbe. • Acte élémentaire. |

Activité 1

documentaire À l'épreuve du temps

p. 72

Capacité exigible

- Mettre en évidence des facteurs cinétiques et l'effet d'un catalyseur.

Analyse des documents

- 1 Transformation lente : oxydation lente par le dioxygène de l'air. Transformation rapide : oxydation rapide lors de la combustion de l'œuvre.
- 2 La combustion se produit en présence du dioxygène de l'air pour produire du dioxyde de carbone CO_2 et de l'eau H_2O .
- 3 D'après le doc. C, une température élevée accélère la dégradation. C'est donc un facteur cinétique.
- 4 Les rayonnements infrarouges peuvent être associés au facteur cinétique « température ».
- 5 $\text{RCH}_2\text{OH} (\text{s}) + 2 \text{NO}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{RCO}_2\text{H} (\text{s}) + 2 \text{NO} (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{g})$
- 6 « Les polluants comme les oxydes d'azote NO_x oxydent la cellulose et ce, d'autant plus vite que leur concentration dans l'atmosphère est élevée ».

Un pas vers le cours

- 7 Un facteur cinétique est un paramètre ayant une influence sur la vitesse de la réaction. Exemples : température, concentration des réactifs, catalyseur.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité est introductive au chapitre. Selon l'esprit des nouveaux programmes, on qualifie de lente ou rapide une réaction si la possibilité de mettre en œuvre un suivi cinétique est envisageable ou non : si le temps de réponse du capteur est trop grand ou si les manipulations à réaliser avant le début des mesures empêchent la mise en œuvre d'un suivi cinétique, la transformation est dite rapide ; sinon, elle est dite lente. Pour notre part, nous avons choisi, dans un premier temps, de garder une première approche dans laquelle on considère qu'une réaction est rapide lorsqu'elle semble achevée dès que les réactifs entrent en contact, et qu'une réaction est lente lorsqu'elle dure de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes. La notion de capteurs est introduite dans un second temps.

Cette activité peut être réalisée en autonomie, à la maison.

Elle permet de se placer dans un parcours artistique et culturel.

Activité 2

expérimentale Suivi cinétique par mesure de pression

p. 73

Capacités exigibles

- Identifier, à partir de données expérimentales, des facteurs cinétiques.
- Mettre en évidence des facteurs cinétiques et l'effet d'un catalyseur.
- Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration.

Matériel :

- Erlenmeyer de 100 mL.
- Bouchon s'adaptant à l'erlenmeyer et relié à un pressiomètre.
- Chronomètre.
- Selon le cas, un dispositif d'acquisition, un tableur, ou une feuille de papier millimétré.

Consommables :

- Carbonate de calcium solide.
- Solution diluée d'acide lactique de concentration $0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Pratique expérimentale

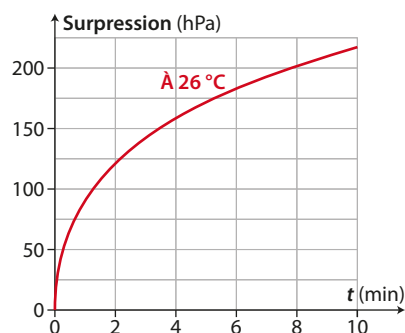
- 1 Masse molaire de l'acide lactique : $M(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 90,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. La solution d'acide lactique a été diluée environ 11 fois puisque le manuel d'utilisation indique de verser une dose de 100 mL de détartrant et d'y ajouter un litre d'eau. Le protocole indique que la solution diluée d'acide lactique a une concentration en acide lactique : $c'(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. La solution commerciale a donc une concentration en acide lactique :
 $c(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 0,4 \times 11 = 4,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$
 $t(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = c(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) \times M(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 4,4 \times 90,1 = 360 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; soit 360 g pour 1,0 L de solution.

La masse volumique de la solution est environ égale à $1,13 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, le titre massique en pourcent de cette solution est égal à $\frac{0,360}{1,13} = 0,35 = 35 \%$. La solution d'acide lactique initiale a un titre massique qui est bien voisin de 35 %.

- 2 Un gaz se dégage.

- 3 Pour une mise en œuvre à $\theta = 26^\circ\text{C}$, un dégagement gazeux est observé, il ralentit au cours du temps. Au bout de 10 min, il reste du solide au fond de l'erlenmeyer.

4



- 5 La pente de la courbe diminue au cours du temps : la pression dans l'erlenmeyer augmente moins rapidement. Cela est en accord avec le ralentissement du dégagement gazeux observé. On n'observe pas de palier au bout de 10 min, on peut donc supposer que la transformation n'est pas finie, ce qui est en accord avec le fait qu'il reste du solide au fond de l'erlenmeyer.

- 6 a. On peut supposer que le chauffage va réduire la durée du détartrage.

- b. On peut supposer que si l'on augmente la concentration en acide lactique, la durée du détartrage va diminuer (et réciproquement).

- 7 Pour mesurer l'influence de la température : reproduire le même protocole en immergeant partiellement l'erlenmeyer dans

un bain thermostaté. La solution d'acide lactique doit également être thermostatée à la température choisie. Faire plusieurs expériences de mesures de pression en changeant la valeur de T , et comparer les résultats.

Pour mesurer l'influence de la concentration : reproduire le même protocole en modifiant la concentration initiale d'acide lactique.

Un pas vers le cours

8 Un système évolue plus rapidement si on augmente la température, et si la concentration des réactifs est augmentée.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Le programme demande de mettre en œuvre un suivi cinétique. Nous avons choisi une première étude par pressiométrie. La construction des concepts se faisant de façon simultanée, nous avons décidé d'intégrer l'étude des facteurs cinétiques. Jusqu'à cinq protocoles peuvent être mis en œuvre simultanément ; les élèves mettent en commun leurs résultats en fin d'activité :

| Concentration \ Température | $\theta_1 < \theta_{\text{ambiante}}$ | θ_{ambiante} | $\theta_2 > \theta_{\text{ambiante}}$ |
|---|---|----------------------------|---------------------------------------|
| | $c_1 < 0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | | Protocole 1 |
| $0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | Protocole 2 | Protocole 3 | Protocole 4 |
| $c_2 > 0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | | Protocole 5 | |

Activité 3

expérimentale La catalyse

Capacités exigibles

- Identifier, à partir de données expérimentales, des facteurs cinétiques.
- Citer les propriétés d'un catalyseur et identifier un catalyseur à partir de données expérimentales.
- Mettre en évidence des facteurs cinétiques et l'effet d'un catalyseur.
- Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration.

Matériel :

Protocole expérimental 1 :

- Quatre béchers.

Protocole expérimental 2 :

- Erlenmeyer.
- Bain-marie thermostaté à 50 °C.
- Balance, coupelle de pesée, spatule.
- Deux fioles jaugées de 100,0 mL avec bouchon.
- Deux fioles jaugées de 50,0 mL avec bouchon.
- Pipette jaugée de 20,0 mL
- Propipette.
- Éprouvette de 20 mL.
- Spectrophotomètre avec trois cuves.

Consommables :

Protocole expérimental 1 :

- Eau oxygénée 30 volumes.
- Fil de platine.
- Solution concentrée de sulfate de cuivre (II).
- Du foie ou de la catalase.

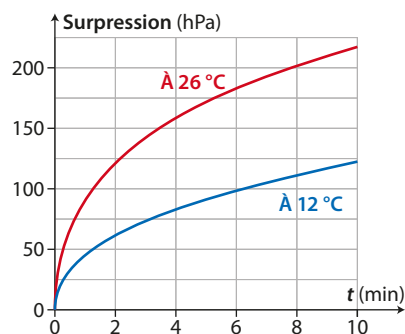
Protocole expérimental 2 :

- Eau oxygénée 20 volumes.
- Sulfate de cuivre (II) solide.

À 40 °C et pour une concentration $c' = 0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, la réaction est beaucoup plus rapide : il est impossible de reboucher l'erlenmeyer sans perte importante de dioxyde de carbone. Les résultats sont donc faussés.

Résultats comparés, obtenus pour $c' = 0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ à 26 °C et 12 °C. La masse de solide restant dans l'erlenmeyer au bout de 10 min à 12 °C est supérieure à celle restant dans l'erlenmeyer au bout de 10 min à 26 °C.

Les graphes donnant les surpressions en fonction du temps sont donnés ci-dessous.



- Eau distillée.
- Solution d'ammoniac de concentration $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Parcours 1 Pratique expérimentale

1 On observe un dégagement gazeux dans tous les béchers sauf le bécher A.

2 Le platine, les ions cuivre (II) et la catalyse jouent le rôle de catalyseurs : ils accélèrent la réaction.

Un pas vers le cours

3 Catalyseur : espèce qui accélère la réaction mais qui n'intervient pas dans l'équation de réaction.

Réaction catalysée : réaction accélérée par la présence d'une espèce. Catalyse hétérogène : le catalyseur et les réactifs sont dans des phases différentes.

Catalyse homogène : le catalyseur et les réactifs sont dans la même phase.

Catalyse enzymatique : le catalyseur est une enzyme.

Parcours 2 Pratique expérimentale

1 On observe un dégagement gazeux dans la solution contenant le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 et pas dans celle contenant l'eau distillée seule.

2 D'après la loi de Beer-Lambert, $A = \epsilon \times \ell \times c$ et la seule espèce colorée de la solution est l'ion $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$.

Donc $A_0 = \epsilon \times \ell \times [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}]_{S_0}$ et $A_1 = \epsilon \times \ell \times [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}]_{S_1}$.

$$\text{Alors } \frac{A_0}{A_1} = \frac{[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}]_{S_0}}{[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}]_{S_1}}$$

3 Les quantités initiales et finales d'ions cuivre (II) sont identiques lors de la réaction catalysée. Le catalyseur est donc consommé puis régénéré.

Un pas vers le cours

4 Un catalyseur a donc deux caractéristiques : il accélère la réaction chimique et il est consommé puis régénéré (sa quantité est la même à l'état initial et à l'état final). Il n'apparaît pas dans l'équation de réaction.

Activité 4 expérimentale Loi de vitesse d'ordre 1

Capacités exigibles

- À partir de données expérimentales, déterminer une vitesse volumique de disparition d'un réactif, une vitesse volumique d'apparition d'un produit ou un temps de demi-réaction.
- Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration.
- Déterminer la vitesse volumique de formation d'un produit ou de disparition d'un réactif.
- Identifier, à partir de données expérimentales, si l'évolution d'une concentration suit ou non une loi de vitesse d'ordre 1.

Matériel :

- Spectrophotomètre avec cuves.
- Trois béchers de 50 mL.
- Chronomètre.
- Deux pipettes jaugées de 10,0 mL.
- Une pipette graduée de 10,0 mL.
- Une pipette graduée de 20,0 mL.
- Propipette.
- Selon le cas, un système d'acquisition ou un tableur.

Consommables :

- Berlingot d'eau de Javel.
- Solution d'érythrosine de concentration : $8,5 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Eau distillée.

Pratique expérimentale

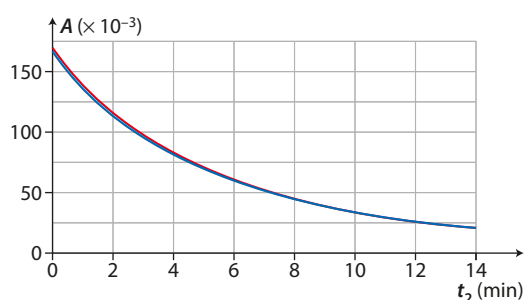
1 Manipulation.

2 Si l'érythrosine est la seule espèce qui absorbe, alors la loi de Beer-Lambert donne $A = \varepsilon \times \ell \times [E]_t$: il y a donc proportionnalité entre l'absorbance mesurée et la concentration d'érythrosine au cours du temps.

3 On trace la courbe $\ln(A) = f(t)$. Si la réaction est d'ordre 1, alors cette courbe sera une droite de pente $-k$.

Remarque : selon le moment de l'année auquel ce chapitre est traité, les élèves n'auront pas encore vu la fonction logarithme népérien en mathématiques. Il est alors possible de tracer $A = f(t)$ et de procéder à une modélisation.

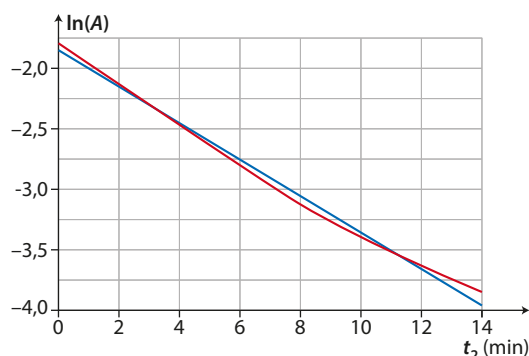
4 Solution 1 :



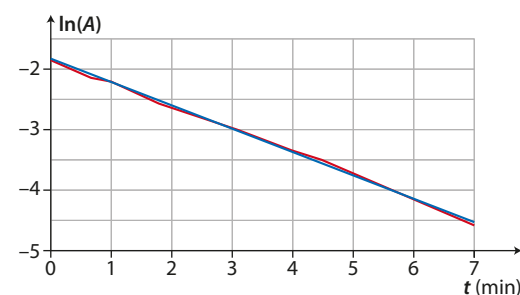
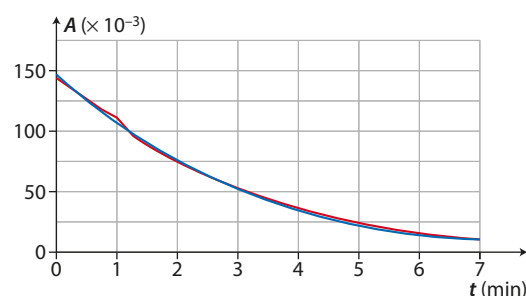
Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Pour faciliter une différenciation pédagogique entre groupes d'élèves ou bien pour s'adapter à la progression du professeur, nous avons choisi de construire cette activité sous la forme de deux parcours.

Le professeur choisit, en fonction de la classe et des élèves qu'il a en responsabilité, de privilégier l'un ou l'autre des parcours, voire les deux parcours simultanément dans la classe.



Solution 2 :



Les résultats montrent que l'absorbance de la solution 2 décroît plus rapidement que celle de la solution 1. Plus la concentration en ions hypochlorite augmente, plus la vitesse de la réaction augmente. La concentration en ions hypochlorite est donc un facteur cinétique.

Un pas vers le cours

5 Une réaction est d'ordre 1 si la concentration du réactif est de la forme $[E]_t = [E]_0 \times \exp(-k \times t)$

Si on applique le logarithme népérien à cette formule :

$$\ln([E]_t) = \ln([E]_0) - k \times t.$$

Il suffit donc de tracer la courbe $\ln([E]_t) = f(t)$; si c'est une droite, alors la réaction suit une loi de vitesse d'ordre 1.

Remarque : pour accéder à $[E]_t$, il faut mesurer une grandeur physique G (absorbance, conductivité, ...) qui soit proportionnelle à $[E]_t$, et alors on pourra tracer $\ln(G) = f(t)$.

Une loi déduite de l'expérience est appelée loi empirique ; c'est une loi validée par l'expérience mais dont on ne connaît pas de base théorique.

Nous avons volontairement construit une activité autour d'une loi empirique car le programme insiste, dans les préambules, sur l'articulation entre le monde des phénomènes, des objets et celui des modèles et des lois. Il nous paraissait important de montrer qu'une loi peut aussi ne pas se fonder sur de la théorie. Inversement, en l'absence de base empirique, c'est la théorie qui peut permettre de prédire. Cette discussion épistémologique avec les élèves peut être intéressante à mener.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité permet de mettre en œuvre un suivi spectrophotométrique.

Activité 5

expérimentale Hydrolyse du chlorure de tertiobutyle p. 76

Capacités exigibles

- Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration.
- Identifier, à partir de données expérimentales, si l'évolution d'une concentration suit ou non une loi de vitesse d'ordre 1.

Matériel :

- Éprouvette graduée de 100 mL.
- Bécher de 200 mL.
- Pipette graduée de 1,0 mL.
- Propipette.

- Conductimètre.
- pH-mètre.
- Agitateur magnétique avec barreau aimanté.
- Chronomètre.
- Selon le cas, un système d'acquisition ou un tableur.

Consommables :

- Eau distillée.
- Éthanol.
- Chlorure de tertiobutyle.

Analyse des documents

1 La réaction d'hydrolyse produit des ions oxonium H_3O^+ ; on peut donc suivre l'évolution de la réaction en mesurant le pH : $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$.

De plus, des ions sont formés : la conductivité de la solution va donc varier. On peut donc suivre l'évolution de la conductivité pour suivre la cinétique de la réaction.

2 a.

| Équation de la réaction | | $(\text{CH}_3)_3\text{C}-\text{Cl} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_3)_3\text{C}-\text{OH} + \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$ | | | | |
|---------------------------------|------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| État du système | Avancement (mol) | Quantités (mol) | | | | |
| État initial | 0 | n_0 | excès | 0 | 0 | 0 |
| État en cours de transformation | x | $n_0 - x$ | excès | x | x | x |
| État final | x_f | $n_0 - x_f$ | excès | x_f | x_f | x_f |

b. Notons CTB le chlorure de tertiobutyle.

$$\text{Méthode pH-métrique : } C(t) = C_0 - \frac{x}{V} = C_0 - [\text{H}_3\text{O}^+] = C_0 - 10^{-\text{pH}}$$

$$\text{Méthode conductimétrique : } \sigma = \lambda(\text{H}_3\text{O}^+) \times [\text{H}_3\text{O}^+] + \lambda(\text{Cl}^-) \times [\text{Cl}^-] = (\lambda(\text{H}_3\text{O}^+) + \lambda(\text{Cl}^-)) \times \frac{x}{V}$$

$$\text{donc } C(t) = C_0 - \frac{x}{V} = C_0 - \frac{\sigma}{\lambda(\text{H}_3\text{O}^+) + \lambda(\text{Cl}^-)}$$

Pratique expérimentale

3 Manipulation.

4

| t (s) | pH (V = 1 mL) | pH (V = 0,5 mL) | $\sigma(V = 1 \text{ mL})$ (mS · cm ⁻¹) | $\sigma(V = 0,5 \text{ mL})$ (mS · cm ⁻¹) |
|-------|---------------|-----------------|---|---|
| 0 | 6,6 | 6,6 | 0,008 | 0,006 |
| 30 | 5,8 | 4,4 | 0,086 | 0,063 |
| 60 | 3,45 | 3,29 | 0,212 | 0,136 |
| 90 | 2,96 | 3,08 | 0,35 | 0,207 |
| 120 | 2,76 | 2,95 | 0,485 | 0,274 |
| 150 | 2,62 | 2,83 | 0,643 | 0,34 |
| 180 | 2,51 | 2,75 | 0,753 | 0,41 |
| 210 | 2,45 | 2,68 | 0,876 | 0,476 |
| 240 | 2,4 | 2,62 | 0,997 | 0,54 |
| 270 | 2,34 | 2,57 | 1,116 | 0,606 |
| 300 | 2,29 | 2,53 | 1,232 | 0,663 |
| 330 | 2,25 | 2,48 | 1,338 | 0,721 |
| 360 | 2,21 | 2,45 | 1,444 | 0,788 |
| 390 | 2,17 | 2,41 | 1,537 | 0,838 |
| 420 | 2,14 | 2,38 | 1,64 | 0,889 |
| 450 | 2,12 | 2,35 | 1,75 | 0,94 |
| 480 | 2,09 | 2,33 | 1,845 | 0,987 |
| 510 | 2,07 | 2,31 | 1,937 | 1,027 |
| 540 | 2,05 | 2,29 | 2,02 | 1,07 |
| 570 | 2,02 | 2,27 | 2,1 | 1,113 |
| 600 | 2,01 | 2,25 | 2,18 | 1,16 |

| t (s) | pH (V = 1 mL) | pH (V = 0,5 mL) | $\sigma(V = 1 \text{ mL})$ (mS · cm ⁻¹) | $\sigma(V = 0,5 \text{ mL})$ (mS · cm ⁻¹) |
|-------|---------------|-----------------|---|---|
| 660 | 1,97 | 2,22 | 2,35 | 1,253 |
| 720 | 1,94 | 2,18 | 2,5 | 1,338 |
| 780 | 1,91 | 2,16 | 2,64 | 1,414 |
| 840 | 1,89 | 2,13 | 2,77 | 1,483 |
| 900 | 1,87 | 2,11 | 2,91 | 1,545 |
| 960 | 1,85 | 2,09 | 3,04 | 1,613 |
| 1 020 | 1,84 | 2,07 | 3,16 | 1,678 |
| 1 080 | 1,81 | 2,05 | 3,27 | 1,738 |
| 1 140 | 1,8 | 2,04 | 3,37 | 1,799 |
| 1 200 | 1,78 | 2,02 | 3,46 | 1,861 |
| 1 260 | 1,77 | 2,01 | 3,56 | 1,906 |
| 1 320 | 1,76 | 2 | 3,64 | 1,955 |
| 1 380 | 1,75 | 1,99 | 3,7 | 2 |
| 1 440 | 1,74 | 1,98 | 3,79 | 2,04 |
| 1 500 | 1,73 | 1,96 | 3,86 | 2,09 |
| 1 560 | 1,72 | 1,95 | 3,95 | 2,13 |
| 1 620 | 1,71 | 1,95 | 4,02 | 2,18 |
| 1 680 | 1,7 | 1,94 | 4,09 | 2,22 |
| 1 740 | 1,69 | 1,93 | 4,15 | 2,26 |
| 1 800 | 1,69 | 1,92 | 4,2 | 2,31 |

5 Il faut discuter ici des incertitudes de mesures dues à chaque capteur, en fonction des indications fournies par le constructeur.

6 Une réaction suit une loi de vitesse d'ordre 1 si la concentration du réactif est de la forme $C(t) = C_0 \times \exp(-k \times t)$.

On peut donc tracer $C(t) = f(t)$ et modéliser la courbe : si elle obéit à une loi exponentielle, alors la réaction est d'ordre 1 par rapport au chlorure de tertio-butyle.

Ou bien, si on applique le logarithme népérien à cette formule : $\ln(C(t)) = \ln(C_0) - k \times t$.

On peut donc tracer la courbe $\ln(C(t)) = f(t)$: si c'est une droite, alors la réaction est d'ordre 1.

7 On trouve que $t_{1/2}$ est du même ordre de grandeur pour les deux expériences. Ici $t_{1/2}$ est calculé par la relation :

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}$$

On peut également dire que la concentration $C(t)$ suit une loi exponentielle.

Un pas vers le cours

8 Pour déterminer si une réaction suit une loi de vitesse d'ordre 1 :
 – on peut faire la réaction en changeant la concentration initiale de réactif et montrer que le temps de demi-réaction ne change pas ;
 – on peut dire que la concentration du réactif en large défaut suit une loi exponentielle.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité peut être réalisée soit en suivi pH-métrique, soit en suivi conductimétrique. La classe peut être partagée en deux : une partie des groupes réalise le suivi pH-métrique et une partie des groupes réalise le suivi conductimétrique.

Capsule vidéo de cours : Loi de vitesse d'ordre 1

QCM

1. C ; 2. A ; 3. B et C ; 4. A et C ; 5. B ; 6. A ; 7. B ; 8. C ; 9. C ; 10. A et C ; 11. B.

p. 81

2 Justifier une méthode expérimentale

- I_2 est l'espèce qui donne la couleur à la solution.
- A et B : quand on divise par 2 la concentration initiale en ions iodure I^- de la solution (expérience B), le diiode I_2 se forme moins vite qu'à l'expérience A.
B et C : quand on divise par 2 la concentration initiale en peroxyde d'hydrogène H_2O_2 (expérience C), le diiode I_2 se forme moins vite qu'à l'expérience B.
A et D : quand on divise par 2 la concentration initiale en ion hydrogène H^+ (expérience D), le diiode I_2 se forme moins vite qu'à l'expérience A.
Ainsi, quand la concentration des réactifs diminue, le système évolue plus lentement.

3 Déterminer des facteurs cinétiques

- Lors de l'expérience A, la quantité de diiode I_2 formé diminue au cours du temps. Pendant 60 s, les quantités produites sont moins importantes : plus la concentration des réactifs diminue, moins on forme de produits, donc plus l'évolution du système est lente. Le raisonnement est identique pour l'expérience B.
- Les deux expériences A et B partent des mêmes quantités initiales de réactifs. Lors de l'expérience B, il est produit plus de diiode I_2 à chaque intervalle de temps, donc l'évolution du système lors de l'expérience B est plus rapide. Or, l'expérience B est réalisée à une température supérieure à celle de A. On en conclut que la température augmente la rapidité d'évolution du système.

4 Étudier l'influence d'un catalyseur

- Le dioxyde de titane est bien un catalyseur et non un réactif, puisque même s'il n'est pas présent (courbe verte), la réaction a lieu.
- On constate que plus la concentration en catalyseur augmente, plus la courbe décroît rapidement en fonction du temps, donc plus l'évolution du système est rapide.

5 Exploiter des informations sur la catalyse

La réaction est plus rapide en présence des oxydes d'azote. Ils sont constamment recyclés, donc totalement régénérés.

6 Déterminer un temps de demi-réaction

- $t_f = 60$ min.
- a. Méthode 1 : les ions argent Ag^+ sont limitants et leur quantité initiale est égale à $0,080 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Pour une concentration égale à $0,040 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $t_{1/2} = 10$ min.
Méthode 2 : la quantité finale d'ions fer (II) Fe^{2+} est égale à $0,040 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
Le temps de demi-réaction correspond au moment où la quantité d'ions fer (II) Fe^{2+} atteint la moitié de sa quantité maximale, soit $0,020 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Donc $t_{1/2} = 10$ min.
- b. $t_f = 6 \times t_{1/2}$. La réaction est achevée.

7 Exploiter un temps de demi-réaction

Le réactif limitant est l'ion permanganate MnO_4^- (aq). Sa concentration initiale est $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le temps de demi-réaction correspond au moment où la concentration en ions permanganate MnO_4^- a été divisée par deux, donc ici lorsqu'elle atteint $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. Cela correspond à un temps de demi-réaction $t_{1/2}$ compris dans l'intervalle [60 s ; 70 s]. La durée de la réaction est environ égale à trois fois le temps de demi-réaction.

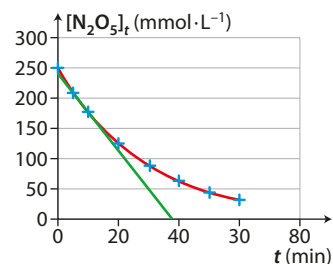
8 Déterminer une vitesse d'apparition

À $t_1 = 0$ min : $v_{app}(I_2)(t_1) = 1,5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

À $t_2 = 10$ min : $v_{app}(I_2)(t_2) = 0,2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
La vitesse d'apparition diminue quand t augmente. Or, quand t augmente, la quantité des réactifs diminue. Donc la baisse de concentration des réactifs ralentit l'évolution du système.

9 Déterminer une vitesse de disparition

- $2 \text{ N}_2\text{O}_5 = 4 \text{ NO}_2 + \text{O}_2$
- À partir du tableau : la vitesse volumique de disparition est égale à l'opposé de la pente de la courbe au point considéré.
Calcul de la pente en $t_1 = 5$ min :
 $\frac{176 - 210}{10 - 5} = -6,8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.
Donc $v_{disp}(N_2O_5)(t_1) = 6,8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.
Graphiquement : on trace la courbe $[N_2O_5]_t = f(t)$ et on calcule la pente de la tangente au point $t_1 = 5$ min qui vaut environ :
 $\frac{250 - 0}{0 - 35} = -7,1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,
donc $v_{disp}(N_2O_5)(t_1) = 7,1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.



- Les écarts proviennent de la manière de calculer la pente. Dans le premier cas, on utilise deux points expérimentaux, dans l'autre cas on trace une tangente au point $t = 5$ min. La deuxième méthode est généralement plus précise.

10 Vérifier un ordre de réaction (1)

- On calcule : $v_{disp}(N_2O_5)(t_i) = - \frac{[N_2O_5](t_{i+1}) - [N_2O_5](t_i)}{t_{i+1} - t_i}$.

| t (min) | Concentration (mmol · L ⁻¹) | Vitesse disparition (mmol · L ⁻¹ · min ⁻¹) |
|---------|---|---|
| 0 | 250 | 8 |
| 5 | 210 | 6,8 |
| 10 | 176 | 5,1 |
| 20 | 125 | 3,6 |
| 30 | 89 | 2,7 |
| 40 | 62 | 1,9 |
| 50 | 43 | 1,2 |
| 60 | 31 | |

2. et 3. On constate que le graphe est une droite passant par l'origine, donc la vitesse volumique de disparition du réactif est proportionnelle à la concentration de N_2O_5 au cours du temps. La réaction suit donc une loi de vitesse d'ordre 1 par rapport à N_2O_5 .

11 Vérifier un ordre de réaction (2)

- Solution A : la concentration initiale en arsenic (III) $As(III)$ est égale à $0,20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le temps de demi-réaction correspond au temps pour lequel la concentration en arsenic (III) $As(III)$ a été divisée par deux par rapport à la concentration initiale. Cela correspond sur le graphe à $t_{1/2} = 20$ min.
Solution B : la concentration initiale en arsenic (III) $As(III)$ vaut $0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le temps de demi-réaction correspond au temps pour lequel la concentration en arsenic (III) $As(III)$ a été divisée par deux par rapport à la concentration initiale. Cela correspond sur le graphe à $t_{1/2} = 20$ min.
- On remarque que $t_{1/2}$ est indépendant de la concentration initiale en arsenic (III) $As(III)$. La réaction suit donc une loi de vitesse d'ordre 1 par rapport à l'arsenic (III) $As(III)$.

12 Côté maths

Déterminer la valeur d'une dérivée

1. À l'instant $t = 0$ min, la vitesse est donnée par la tangente à la courbe au point $(0 ; 0)$:

$$v = \frac{0,5 - 0}{2,5 - 0} = 0,2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

$$2. c'(t) = -\frac{3}{50}t^2 + \frac{20}{50}t + \frac{10}{50}$$

$$c'(0) = -\frac{3}{50} \times 0^2 + \frac{20}{50} \times 0 + \frac{10}{50} = \frac{10}{50}$$

$$c'(0) = 0,2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

Exercices

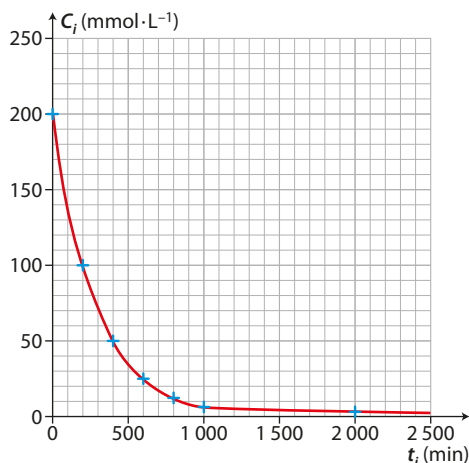
S'entraîner

p. 86

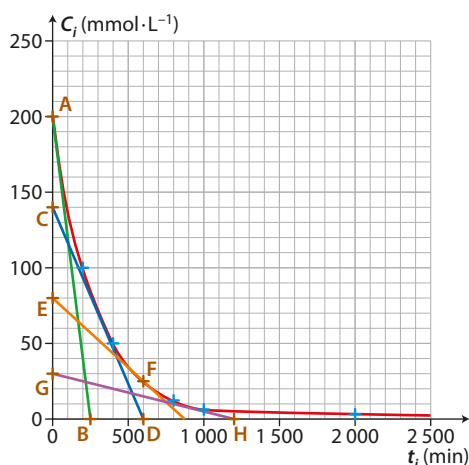
13 Connaître les critères de réussite

Hydrolyse du saccharose

1. Tracé de la courbe $C_i = f(t_i)$.



2. On trace les tangentes aux points 0, 300, 600 et 900 min.



La vitesse volumique de disparition est égale à l'opposé de la pente de la tangente à la courbe au point considéré.

• Calcul de la pente en $t = 0$ min grâce au segment AB :

$$\frac{0 - 200}{250 - 0} = -0,80 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

$$\text{Donc } v_{\text{disp}}(0) = 0,80 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

• Calcul de la pente en $t = 300$ min grâce au segment CD :

$$\frac{0 - 140}{600 - 0} = -0,23 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

$$\text{Donc } v_{\text{disp}}(300) = 0,23 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

• Calcul de la pente en $t = 600$ min grâce au segment EF :

$$\frac{0 - 80}{850 - 0} = -0,09 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

$$\text{Donc } v_{\text{disp}}(300) = 0,09 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

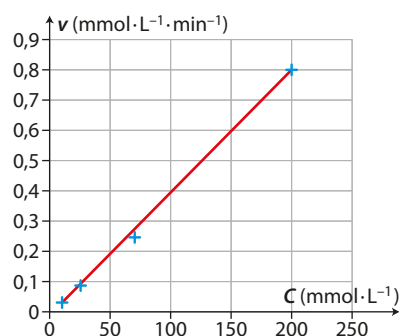
• Calcul de la pente en $t = 900$ min grâce au segment GH :

$$\frac{0 - 30}{1200 - 0} = -0,03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

$$\text{Donc } v_{\text{disp}}(900) = 0,03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}.$$

3. Pour les valeurs 300 et 900 min, on lit la valeur de la concentration sur le graphe précédent :

| t (min) | Concentration (mmol · L ⁻¹) | Vitesse disparition (mmol · L ⁻¹ · min ⁻¹) |
|---------|---|---|
| 0 | 200 | 0,80 |
| 300 | 70 | 0,23 |
| 600 | 25 | 0,09 |
| 900 | 10 | 0,03 |



On constate que la vitesse volumique de disparition du saccharose est proportionnelle à la concentration de saccharose au cours du temps. La réaction suit donc un ordre 1 par rapport au saccharose.

14 À chacun son rythme

Modélisation d'une courbe

1. On utilise la loi de Beer Lambert : $A = \epsilon \times \ell \times C$ pour déterminer $[I_2]_t$.

| | | | | | |
|-------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| t (min) | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 |
| A | 0 | 0,349 | 0,670 | 0,940 | 1,178 |
| $[I_2]_t$ (mmol · L ⁻¹) | 0 | 0,293 | 0,563 | 0,790 | 0,990 |

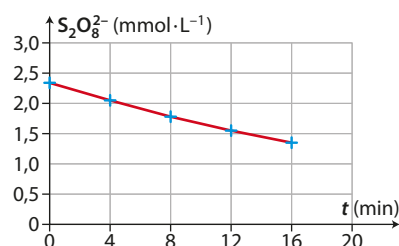
2. D'après l'équation bilan, quand une molécule de $S_2O_8^{2-}$ disparaît, une molécule de I_2 apparaît.

$$\text{Donc } [S_2O_8^{2-}]_t = [S_2O_8^{2-}]_0 - [I_2]_t.$$

3.

| | | | | | |
|---|------|-------|-------|-------|-------|
| t (min) | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 |
| $[I_2]_t$ (mmol · L ⁻¹) | 0 | 0,293 | 0,563 | 0,790 | 0,990 |
| $[S_2O_8^{2-}]_t$ (mmol · L ⁻¹) | 2,34 | 2,05 | 1,78 | 1,55 | 1,35 |

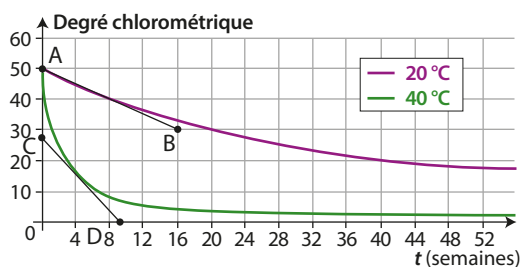
4.



5. Les points expérimentaux suivent le modèle mathématique exponentiel avec $k = 0,034 \text{ min}^{-1}$.

15 L'eau de Javel

1. a. On trace la tangente à chaque courbe au point $t = 4$ semaines.



Pour la courbe à 20 °C, la pente calculée graphiquement grâce au segment AB :

$$-\frac{30 - 50}{16 - 0} = -1,1 \text{ degré} \cdot \text{semaine}^{-1}$$

Donc $v_{\text{disp}}(\text{ClO}^-) = 1,1 \text{ degré} \cdot \text{semaine}^{-1}$.

Pour la courbe à 40 °C, la pente calculée graphiquement grâce au segment CD :

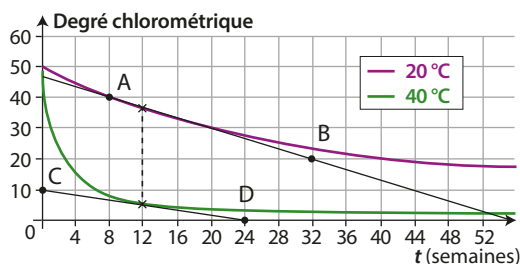
$$-\frac{0 - 50}{10 - 0} = -5,0 \text{ degré} \cdot \text{semaine}^{-1}$$

Donc $v_{\text{disp}}(\text{ClO}^-) = 5,0 \text{ degré} \cdot \text{semaine}^{-1}$.

b. On constate donc que quand la température augmente, la vitesse de disparition augmente considérablement. C'est le facteur cinétique « température » qui est donc mis ici en évidence.

c. La recommandation « à conserver au frais » est donc justifiée pour limiter la vitesse de disparition des ions hypochlorite.

2. a. Comme à la question 1. a., on détermine la vitesse de disparition par mesure de la pente de la tangente en $t = 12$ semaines pour chaque courbe.



Pour la courbe à 20 °C, la pente calculée graphiquement grâce au segment AB :

$$-\frac{20 - 40}{32 - 12} = -0,8 \text{ degré} \cdot \text{semaine}^{-1}$$

Donc $v_{\text{disp}}(\text{ClO}^-) = 0,8 \text{ degré} \cdot \text{semaine}^{-1}$.

Pour la courbe à 40 °C, la pente calculée graphiquement grâce au segment CD :

$$-\frac{0 - 10}{24 - 12} = -0,8 \text{ degré} \cdot \text{semaine}^{-1}$$

Donc $v_{\text{disp}}(\text{ClO}^-) = 0,8 \text{ degré} \cdot \text{semaine}^{-1}$.

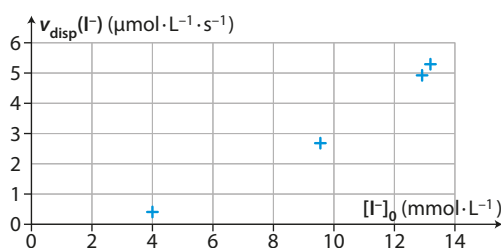
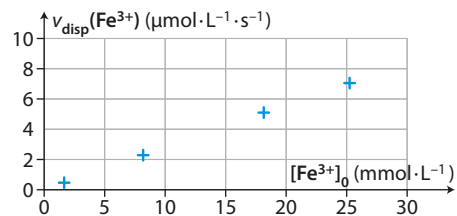
b. On constate que pour chaque courbe, la vitesse de disparition diminue avec le temps. Or la concentration en ions hypochlorite diminue également avec le temps. On en conclut que la vitesse de disparition diminue avec la concentration en réactif.

3. La lumière doit être un catalyseur qui accélère la vitesse de disparition des ions hypochlorite.

16 Oxydation des ions iodure

On trace pour chaque série de mesures la courbe donnant la vitesse de disparition en fonction de la concentration du réactif introduit en quantité variable.

Pour une réaction d'ordre 1 par rapport à un réactif, la vitesse de disparition est proportionnelle à la concentration de ce réactif. Il suffit donc de déterminer laquelle des deux courbes est une droite.



On conclut donc que la réaction suit une loi de vitesse d'ordre 1 par rapport aux ions fer (III) $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$.

17 Fast and Furious

1. et 2. a. La réaction est lente : elle peut être suivie par un capteur comme un pressiomètre.

b. La température est un facteur cinétique pour la réaction de décomposition du protoxyde d'azote $\text{N}_2\text{O}(\text{g})$; la forte augmentation de la température lors de la combustion dans le moteur va augmenter la vitesse de production de dioxygène $\text{O}_2(\text{g})$ et ainsi augmenter les performances du moteur.

3. En notant x l'avancement de la réaction :

| État du système | Avancement (mol) | $\text{N}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g})$ | | |
|--|------------------|--|-------|------------------|
| État initial (à $t = 0$) | 0 | n_0 | 0 | 0 |
| État en cours de transformation (à t) | x | $n_0 - x$ | x | $\frac{1}{2}x$ |
| État final (à $t = t_f$) | x_f | $n_0 - x_f$ | x_f | $\frac{1}{2}x_f$ |

4. a. D'après la loi des gaz parfaits, $P \times V = n \times R \times T$.

En appliquant cette loi à l'instant initial pour lequel $n_{\text{tot gaz}} = n_0$,

$$\text{alors : } P_0 = \frac{n_0 RT}{V}$$

b. À un instant t quelconque de la réaction,

$$n_{\text{tot gaz}} = (n_0 - x) + x + \frac{x}{2} = n_0 + \frac{x}{2}$$

$$\text{Donc } P = n_{\text{tot gaz}} \times \frac{RT}{V} = \left(n_0 + \frac{x}{2}\right) \times \frac{RT}{V}$$

$$\text{c. } P = \left(n_0 + \frac{x}{2}\right) \times \frac{RT}{V} = \left(n_0 \times \frac{RT}{V}\right) + \left(\frac{x}{2} \times \frac{RT}{V}\right)$$

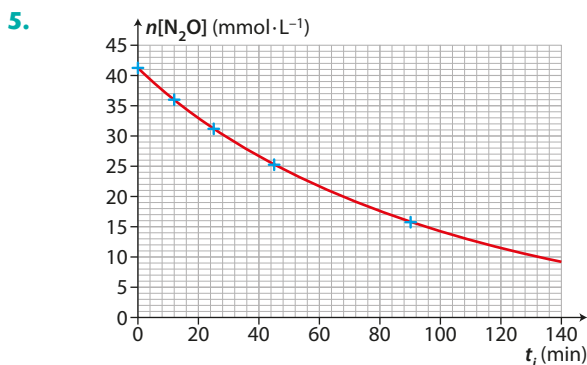
$$P = P_0 + n(\text{O}_2) \times \frac{RT}{V}$$

$$\text{Donc } n(\text{O}_2) = \frac{V}{RT} \times (P - P_0)$$

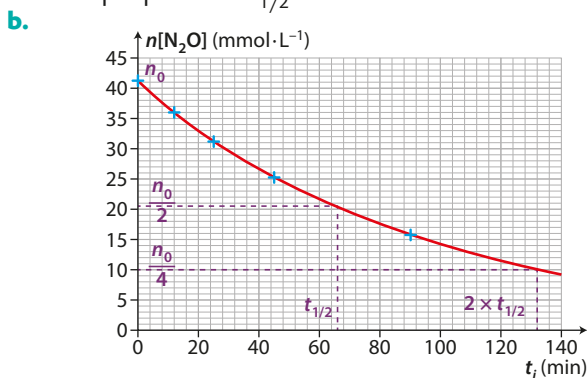
$$= \frac{n_0}{P_0} \times (P - P_0) = n_0 \times \left(\frac{P}{P_0} - 1\right)$$

$$\text{d. } n(\text{N}_2\text{O}) = n_0 - x = n_0 - 2n(\text{O}_2) = n_0 - 2n_0 \times \frac{P}{P_0} + 2n_0$$

$$n(\text{N}_2\text{O}) = n_0 \times \left(3 - 2\frac{P}{P_0}\right)$$



6. a. Graphiquement : $t_{1/2} = 66$ min.



Pour $t_1 = 2 \times t_{1/2} = 132$ min, $n(\text{N}_2\text{O})_{t_1} = 9,9$ mmol.

Or $\frac{n_0}{2} = 20,7$ mmol et $\frac{n_0}{4} = 10,3$ mmol.

Donc $n(\text{N}_2\text{O})_{t_1}$ est environ égal à la moitié de $\frac{n_0}{2}$: on constate

qu'entre $t_{1/2}$ et $2 \times t_{1/2}$, la quantité de protoxyde d'azote N_2O (g) a été de nouveau divisée par 2.

Ceci est caractéristique d'une réaction d'ordre 1 (par rapport au protoxyde d'azote N_2O (g)).

7. Plus l'admission de protoxyde d'azote N_2O (g) sera grande, plus du dioxygène O_2 (g) sera produit, plus les performances du moteur seront augmentées, plus la vitesse du véhicule sera grande.

18 Résolution de problème

Antibiothérapie

Des pistes de résolutions peuvent être fournies par le professeur :

S'approprier

- Le pic sérique C_{\max} est la concentration maximale atteinte par l'antibiotique dans le plasma après sa prise.
- Une deuxième administration de l'antibiotique est nécessaire quand sa concentration passe sous la CMI, soit : $C = \text{CMI}$.

Analyser

- Pour exprimer complètement la loi exponentielle $C = C_{\max} \times \exp(-k \times t)$, il faut déterminer k .
- La constante k peut être déterminée en utilisant le fait que, à $t_{1/2}$, la concentration maximale a été divisée par deux.

Réaliser

- $k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$

Une démarche attendue de résolution par l'élève peut être la suivante :

1^{re} étape : Bien comprendre la question posée

1. Qu'est-ce qu'un antibiotique « temps dépendant » ?
2. Peut-on injecter n'importe quelle dose d'antibiotique ?
3. Pourquoi faut-il administrer une deuxième dose d'antibiotique ?
4. Comment savoir au bout de combien de temps l'antibiotique ne fait-il plus effet ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. Un antibiotique est « temps dépendant » s'il met un certain temps à agir et qu'une augmentation de sa concentration est sans effet.

2. On ne peut pas injecter n'importe quelle dose d'antibiotique : pour que l'antibiotique soit efficace, sa concentration dans le sérum sanguin doit être au minimum égale à la concentration minimale inhibitrice ou CMI.

3. Il faut administrer une deuxième dose d'antibiotique parce que sa concentration dans le sang diminue au cours du temps.

Remarque : une nouvelle question peut alors apparaître après avoir répondu à cette question :

3 bis. Comment évolue la concentration en antibiotique au cours du temps ?

Réponse à la question **3 bis** : La concentration du médicament dans le sang au cours du temps suit une loi exponentielle $C = C_{\max} \times \exp(-k \times t)$, où k est la constante d'élimination.

4. Il faut tenir compte des paramètres comme le temps de demi-vie d'élimination, la concentration sérique maximale ou la concentration minimale inhibitrice.

3^e étape : Dégager la problématique

Pendant combien de temps, après le pic sérique, la dose administrée permettra-t-elle de se maintenir au-dessus de la CMI ?

4^e étape : Construire la réponse

- Déterminer k afin d'exprimer la loi exponentielle.
- Déterminer le temps t au bout duquel une deuxième injection devra être administrée.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

Un antibiotique est administré à un patient. La concentration dans le sang de ce médicament « temps dépendant » diminue au cours du temps. Il nous est demandé de déterminer la durée pendant laquelle la dose administrée permettra de se maintenir au-dessus de la CMI, c'est-à-dire de déterminer la plus faible concentration d'antibiotique qui a une efficacité contre les bactéries.

- Mettre en forme la réponse.

La concentration dans le sang de l'antibiotique suit une loi exponentielle : $C = C_{\max} \times \exp(-k \times t)$, où k est la constante d'élimination. Pour qu'il soit efficace, sa concentration doit être au minimum égale à la concentration minimale inhibitrice ou CMI.

Déterminons k afin d'exprimer la loi exponentielle.

Le temps de demi-réaction est défini comme le temps au bout duquel la quantité initiale de réactif a été divisée par 2, donc atteint $\frac{C_{\max}}{2}$.

On obtient alors : $\frac{C_{\max}}{2} = C_{\max} \times \exp(-k \times t_{1/2})$

Donc $\frac{1}{2} = \exp(-k \times t_{1/2})$.

On applique le logarithme népérien : $\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -k \times t_{1/2}$

donc $k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$.

Soit $k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$; $k = 0,693 \text{ h}^{-1}$.

Une deuxième administration de l'antibiotique est nécessaire quand sa concentration passe sous la CMI, soit $C = \text{CMI} = 0,5 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$: $C_{\max} \times \exp(-k \times t) = \text{CMI}$,

donc $t = \frac{1}{k} \times \ln\left(\frac{C_{\max}}{\text{CMI}}\right) = \frac{1}{0,693} \times \ln\left(\frac{24}{0,5}\right)$.

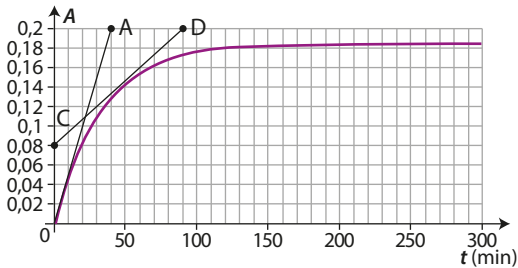
Soit $t = 5,6$ h, environ 5 h 35 min.

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

Au bout de cinq heures et demi environ, une deuxième dose d'antibiotique devra être injectée afin d'assurer une efficacité au traitement.

19 Analyse médicale

- Le PNP est la seule espèce colorée de la réaction.
- D'après l'équation de la réaction, on peut déduire :
 $[PNPP](t) = [PNPP]_0 - [PNP](t)$
 $[PNPP](t) = [PNPP]_0 - \frac{A}{k}$
- a. Un catalyseur est une espèce qui accélère une réaction chimique. Il n'apparaît pas dans l'équation de la réaction car il est consommé puis régénéré totalement.
 b. L'enzyme PAL est un catalyseur car en sa présence, la vitesse de la réaction est augmentée, et elle n'apparaît pas dans l'équation de la réaction.
 c. On parle de catalyse enzymatique.
- a. On mesure la pente de la tangente aux points considérés :



Pour $t = 0$ min : $\frac{0,2 - 0}{40 - 0} = 5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$.

Or $[PNP] = \frac{A}{k}$

Donc $v_{\text{app}}(\text{PNP}) = 2,7 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Pour $t = 50$ min, $\frac{0,2 - 0,08}{90 - 0} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$.

Or $[PNP] = \frac{A}{k}$

Donc $v_{\text{app}}(\text{PNP}) = 7,0 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

b. La vitesse d'apparition diminue avec le temps, car la concentration en réactif diminue.

5. Le temps de demi-réaction est le temps nécessaire pour que la quantité de produit atteigne la moitié de la quantité maximale. Or la concentration est proportionnelle à l'absorbance.

On lit $A_{\text{max}} = 0,18$. On cherche donc le temps pour avoir $A = 0,09$: graphiquement, $t_{1/2} = 22$ min.

6. Le temps de demi-réaction est de 22 minutes, ce qui est relativement long.

7. On constate que lorsqu'on se place à $t = 2 \times t_{1/2} = 44$ min, l'absorbance vaut 0,13.

Donc entre $t_{1/2}$ et $2 \times t_{1/2}$, l'absorbance a augmenté de $(0,13 - 0,09) = 0,04$, ce qui représente environ $\frac{A_{\text{max}}}{4}$.

Idem entre $2 \times t_{1/2}$ et $3 \times t_{1/2}$, l'absorbance a augmenté de $(0,155 - 0,13) = 0,025$, ce qui représente environ $\frac{A_{\text{max}}}{8}$. Cela est caractéristique d'une réaction d'ordre 1.

20 How to program a temporel evolution

Ressources pour le professeur à télécharger :
Fichier Python

Traduction : Le début d'un programme Python est donné ci-dessous (doc. A). Le programme complet peut être téléchargé.

- Télécharger le programme et le tester sur l'exercice 13.
- Identifier la ligne du programme qui calcule, à tout instant, la vitesse de disparition du saccharose.
- Justifier son expression.

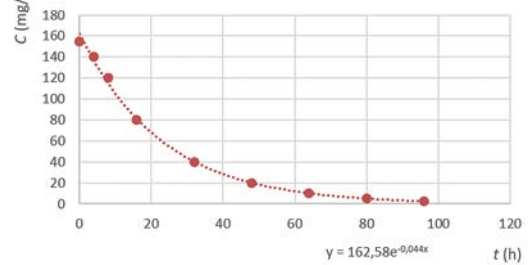
Réponses

2. Les lignes du programme permettant de calculer les vitesses de disparition sont les lignes 9 à 11.

3. Par définition : $v_d(i) = \frac{|C(i+1) - C(i)|}{t(i+1) - t(i)}$.

21 Administration d'un médicament

1. Evolution temporelle de la concentration



2. En modélisant, par une exponentielle $C = C_0 \times \exp(-k \times t)$, l'évolution de cette concentration, on trouve une ordonnée à l'origine égale à $C_0 = 163 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

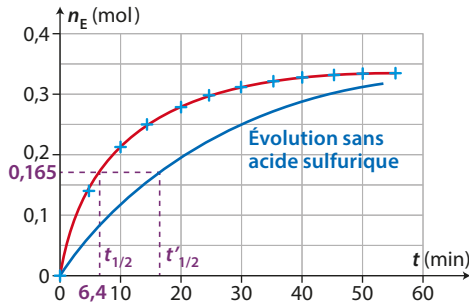
3. $V_D = \frac{m_0}{C_0} = \frac{2,0}{0,163} = 12 \text{ L}$.

Le volume est faible, ce qui signifie que le médicament est peu absorbé par les tissus. Si on définit la biodisponibilité comme étant la fraction de la dose de médicament administré qui atteint la circulation sanguine, et dans la mesure où le médicament est peu absorbé par les tissus, on peut dire que la biodisponibilité semble faible pour ce médicament.

Préparation à l'écrit

22 CORRIGÉ Le parfum de poire

1. Voir la courbe en bleu sur le graphique suivant.



2. La vitesse d'apparition de l'acétate d'amyle à un instant t est égale au coefficient directeur de la tangente à la courbe à cet instant. Au cours du temps, si on trace quelques tangentes en des points différents, on constate que leur coefficient directeur diminue. La vitesse d'apparition de l'acétate d'amyle diminue donc au cours du temps.

3. Le temps de demi-réaction est le temps qu'il faut pour former la moitié de la quantité finale de produit.

Ici $n_{E_{\max}} = 0,330 \text{ mol}$ donc $\frac{n_{E_{\max}}}{2} = 0,165 \text{ mol}$, qui est atteint pour un temps $t = t_{1/2} = 6,4 \text{ min}$ (voir la construction sur le graphique ci-dessus).

4.a. Sans ajout d'acide sulfurique, qui joue le rôle de catalyseur, la vitesse de réaction diminuerait, et donc le temps de demi-réaction serait plus grand. En augmentant la température, qui est un facteur cinétique, la vitesse de réaction augmenterait, et donc le temps de demi-réaction serait plus petit.

b. L'état d'équilibre sera plus long à atteindre. Mais l'état final sera le même (voir l'allure de la courbe représentée en rouge sur le graphique).

23 CORRIGÉ Ordre d'une réaction

1. La relation $v = k \times [H_2O_2]$ montre que la vitesse de disparition du peroxyde d'hydrogène est proportionnelle à sa concentration. La réaction est donc d'ordre 1 par rapport au peroxyde d'hydrogène.

2. Le programme simule l'évolution de la concentration en peroxyde d'hydrogène pour des intervalles de temps $\Delta t = 0,01 \text{ h}$. Pour comparer avec l'expérience faite pendant 6 h, on choisit donc de faire le calcul sur $N = 600$ points afin que la durée totale soit égale à $0,01 \times 600 = 6 \text{ h}$.

3. La vitesse de disparition est définie par :

$$v_{\text{disp}} = - \frac{C[i+1] - C[i]}{t[i+1] - t[i]}$$

Or $v_{\text{disp}} = k \times C[i]$ donc $C[i+1] = C[i] - (t[i+1] - t[i]) \times k \times C[i]$ qui est la relation de la ligne 11 du programme.

4. Ce sont les lignes 13 à 15 qui conduisent au tracé de l'évolution de la concentration mesurée expérimentalement en fonction du temps.

24 CORRIGÉ Vitesse d'une réaction

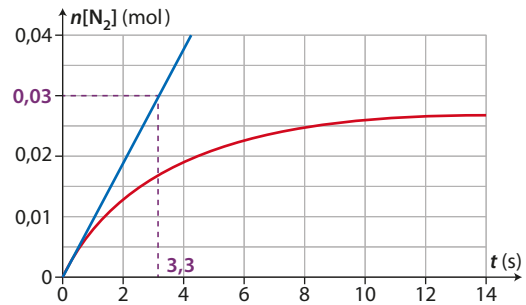
1.a. Un catalyseur est une espèce qui accélère une réaction chimique. Au cours de la transformation, il est consommé puis régénéré totalement. Sa formule n'apparaît pas dans l'équation de la réaction.

b. « ...métaux nobles tels que le Pt qui accélèrent notamment la réaction de réduction des oxydes d'azote... »

« ...les métaux nobles, bien que non consommés, ... »

2. Le diazote étant un gaz, on peut utiliser comme capteur un pressiomètre.

3. La vitesse peut être déterminée graphiquement : c'est la pente de la tangente à la courbe donnant l'évolution de $n_{N_2}(t)$. On trace la tangente au point $t = 0$. Elle passe par le point $A(3,33 \text{ s} ; 0,03 \text{ mol})$.



La vitesse instantanée d'apparition du diazote est égale à :

$$v(0) = \frac{0,03 - 0}{3,3 - 0} = 0,009 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$$

Remarque : la vitesse s'exprime en $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ et non en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ car les données sont exprimées en mol et non en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

4. D'après l'énoncé, $5 \times 10^4 \text{ L}$ de gaz sortent en moyenne du pot d'échappement par heure, soit approximativement $14 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le volume molaire étant égal à $30 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$, cela représente une quantité de gaz de $\frac{14}{30} = 0,47 \text{ mol}$ par seconde.

La moitié du gaz est du monoxyde d'azote soit une quantité d'environ $0,23 \text{ mol}$ par seconde.

La vitesse de production de monoxyde d'azote $\text{NO}(\text{g})$ par le pot d'échappement est donc approximativement de $0,23 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$. Or la question 3.b. nous a montré que la vitesse d'apparition de diazote $\text{N}_2(\text{g})$ est égale approximativement à $0,009 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$. D'après l'équation de réaction, quand une mole de diazote $\text{N}_2(\text{g})$ est formée, deux moles de monoxyde d'azote $\text{NO}(\text{g})$ sont consommées. Donc la vitesse de disparition du monoxyde d'azote $\text{NO}(\text{g})$ est environ égale à $0,009 \times 2 = 0,018 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$.

On constate donc que la vitesse de production de monoxyde d'azote $\text{NO}(\text{g})$ par le pot d'échappement est $\frac{0,23}{0,018} = 12,7$, soit environ 13 fois plus grande que la vitesse de disparition du monoxyde d'azote $\text{NO}(\text{g})$ par la réaction proposée. On ne peut donc pas remplacer le pot catalytique par cette réaction.

Préparation à l'ECE

1. En mélangeant la soude et l'éthanoate d'éthyle, d'après l'équation de la réaction chimique, un ion HO^- est remplacé par un ion $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$. Or ces deux ions ont des conductivités molaires ioniques différentes, donc la conductivité de la solution va varier au cours du temps. Et cette variation va directement dépendre de la variation de $[\text{HO}^-]$. Le suivi cinétique est donc possible.

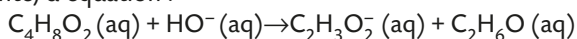
2. Protocole du suivi cinétique :

- Prélever 20 mL de la solution d'hydroxyde de sodium de concentration C_0 grâce à la poire à pipeter et à la pipette jaugée de 20 mL fournie, et introduire ce volume dans un bécher de 200 mL.
- Prélever environ 80 mL d'eau distillée dans l'éprouvette graduée de 100 mL et les ajouter dans le bécher.
- Ajouter un barreau aimanté dans le bécher et positionner le bécher sur un agitateur magnétique.
- Tremper la cellule du conductimètre dans le bécher en vous assurant qu'elle est bien immergée et mettre en marche l'agitateur magnétique.
- Lire la valeur de la conductivité de la solution à cet instant ($t = t_0$).

- Prélever 2 ml d'éthanoate d'éthyle pur grâce à la poire à pipeter et à la pipette jaugée de 2 mL fournie.
- Introduire les 2 mL d'éthanoate d'éthyle pur dans le bécher et déclencher un chronomètre.
- Relever la valeur de la conductivité de la solution à intervalles de temps réguliers.

Sujet complet fourni dans la version numérique :

L'éthanoate d'éthyle $C_4H_8O_2$ (ℓ) est un solvant mais il est rarement utilisé en raison de sa réactivité avec les bases. Il peut réagir avec les ions hydroxyde HO^- (aq) selon la réaction, quasi-totale et lente, d'équation :



Un étudiant en chimie souhaite tester la réactivité de l'éthanoate d'éthyle avec les ions hydroxyde afin de savoir si cette réaction est suffisamment lente pour pouvoir utiliser l'éthanoate d'éthyle en milieu basique.

Produits et matériel mis à disposition :

- Solution d'hydroxyde de sodium Na^+ (aq) + HO^- (aq) de concentration $C_0 = 2,5 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$; éthanoate d'éthyle pur.
- Bécher de 200 mL, conductimètre, agitateur magnétique, pipettes jaugées de 2,0 mL et 20,0 mL, poire à pipeter, chronomètre, éprouvettes graduées de 10 mL et 100 mL, pipette graduée de 5 mL, ordinateur avec tableur.

Données

- Conductivités molaires ioniques à 25°C en $S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$:
 $\lambda(C_2H_3O_2^-) = 4,09 \times 10^{-3}$; $\lambda(HO^-) = 19,9 \times 10^{-3}$;
 $\lambda(Na^+) = 5,01 \times 10^{-3}$.
- Dilution due à l'ajout de l'éthanoate d'éthyle : négligée.

Élaborer un protocole ANA-RAIS (20 min)

1. Justifier qu'il est possible de réaliser le suivi cinétique en utilisant la variation au cours du temps de la conductivité du mélange.
2. Proposer un protocole expérimental détaillé permettant d'effectuer le suivi cinétique dans le cas d'un mélange entre un

volume $V_0 = 20,0 \text{ mL}$ d'hydroxyde de sodium de concentration C_0 , 80 mL d'eau distillée et 2 mL d'éthanoate d'éthyle pur (en excès).

APPEL N° 1 : Appeler le professeur pour lui présenter le protocole expérimental proposé ou en cas de difficulté

Mise en œuvre du protocole expérimental RÉA (30 min)

3. Mettre en œuvre le protocole expérimental.
4. En utilisant la relation ci-dessous, tracer la courbe de l'évolution la concentration en ion hydroxyde au cours du temps $[HO^-] = f(t)$.

$$[HO^-]_t = 5,0 \times 10^{-3} \times \frac{\sigma_t - \sigma_f}{\sigma_0 - \sigma_f} \text{ où :}$$

- σ_t est la conductivité de la solution à l'instant t ;
- σ_f est la conductivité de la solution dans l'état final du système ;
- σ_0 est la conductivité de la solution dans l'état initial du système.

APPEL FACULTATIF : Appeler le professeur en cas de difficulté lors de la mise en œuvre du protocole expérimental ou lors du tracé de la courbe.

Analyse de la courbe VAL (10 min)

5. Analyser la courbe $[HO^-] = f(t)$ tracée ci-dessus afin d'effectuer une étude cinétique de la transformation étudiée et de répondre à la problématique de l'étudiant.

APPEL N°2 : Appeler le professeur pour lui présenter le résultat de l'étude cinétique ou en cas de difficulté.

Remarque : on attend de l'élève qu'il détermine le temps de demi-réaction et qu'il modélise la courbe par une fonction exponentielle du type $C = C_0 \times \exp(-k \times t)$.

Il peut conclure que cette réaction est d'ordre 1 par rapport aux ions hydroxyde et que le temps de demi-réaction étant petit, l'éthanoate d'éthyle ne peut pas être utilisé comme solvant en milieu basique.

Il peut également remarquer que C_0 est proche de $5,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$, c'est-à-dire la concentration initiale des ions hydroxyde dans le mélange réactionnel.

Vers l'oral

p. 92

Élaborer un mémo

- Inscrire l'idée principale au centre de la feuille.
- Lister les mots-clés, les définitions du chapitre et les organiser sur des branches (symbole, mot-clé, courte définition, schéma, etc.) ; les couleurs servent la lisibilité.

À deux, c'est mieux

Évaluation orale n° 1 :

- Textuelle

L'urée est susceptible de se décomposer en carbonate d'ammonium. On veut étudier l'effet de l'uréase, **enzyme** pouvant être introduite dans le milieu réactionnel, ainsi que l'influence de la **température** sur la **cinétique** de la décomposition. Pour cela, on réalise trois mélanges réactionnels.

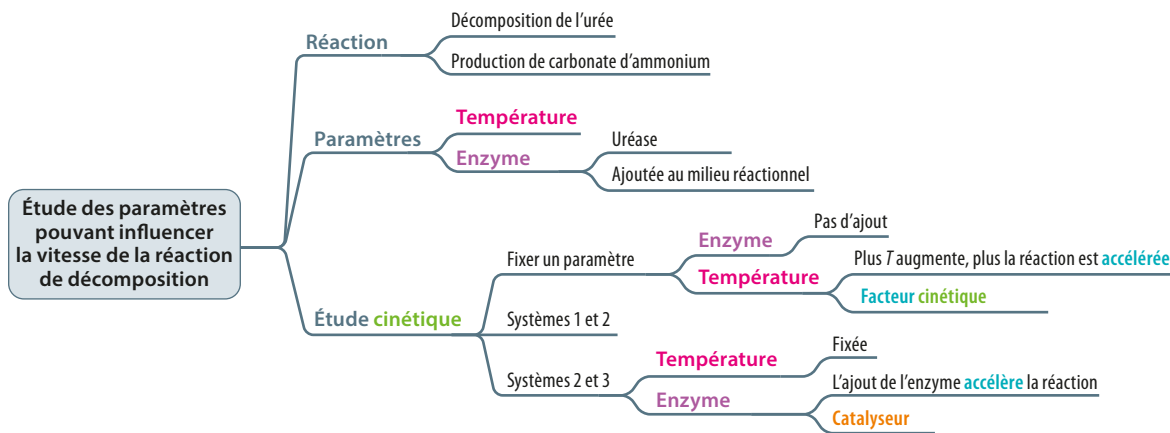
Pour étudier ces influences, il est nécessaire de les envisager séparément et donc, de fixer l'un des deux paramètres pour étudier l'influence de l'autre.

- La lecture se fait dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du haut.

Dans les systèmes 1 et 2, seule la **température** varie et il n'est pas ajouté d'**enzyme**. Dans le système 2, lorsque la **température** est plus grande, la durée de décomposition est plus faible. La température est donc un **facteur cinétique** qui **accélère** la réaction de décomposition.

Dans les systèmes 2 et 3, la **température** est fixée. Dans le système 3, l'ajout de l'**enzyme** dans le milieu diminue la durée de décomposition. L'**enzyme** est donc un **catalyseur** qui **accélère** la réaction de décomposition. Cette hypothèse est renforcée par le fait qu'elle n'apparaît pas dans l'équation de la réaction.

• Carte mentale



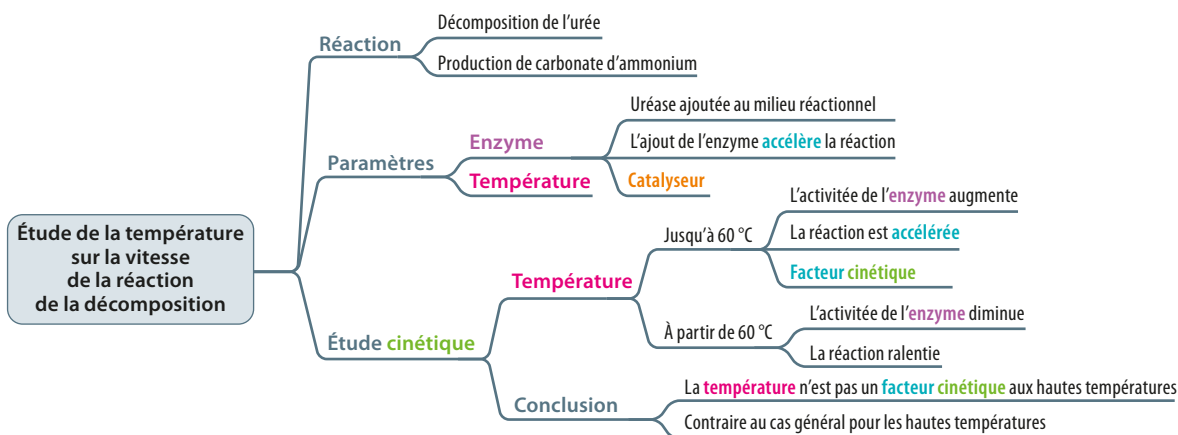
Évaluation orale n° 2 :

• Textuelle

L'urée est susceptible de se décomposer en carbonate d'ammonium. On veut étudier l'effet de la température sur la cinétique de la décomposition de l'urée par l'uréase, enzyme introduite dans le milieu réactionnel. Pour commencer, on peut émettre l'hypothèse que l'enzyme est un catalyseur qui accélère la réaction de décomposition car sa formule n'apparaît pas dans l'équation de la réaction.

Ensuite, la courbe nous présente l'évolution de l'activité de l'enzyme en fonction de la température. On constate que, jusqu'à une température approximativement égale à 60 °C, l'activité de l'enzyme augmente. Si on émet l'hypothèse que la cinétique de la réaction est liée à l'activité de l'enzyme, la température est donc un facteur cinétique qui accélère la réaction de décomposition. Cependant, à partir d'une température égale à 60 °C, l'activité de l'enzyme diminue. Contrairement au cas général, il ne faut donc pas forcément augmenter de trop la température pour accélérer la réaction.

• Carte mentale



Je m'exprime à l'oral sur

L'évolution temporelle d'un système

• Définir le temps de demi-réaction.

Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ d'un système est la durée nécessaire pour que la moitié du réactif limitant soit consommé.

• Citer deux facteurs cinétiques.

La température et la concentration sont deux facteurs cinétiques.

• Comment suivre l'évolution de la concentration d'un ion en solution ?

On peut suivre cette évolution par conductimétrie.

• Comment vérifier que l'évolution d'une concentration suit une loi de vitesse d'ordre 1 ?

Voir ci-dessous :

Lorsque le réactif B est en large excès, la réaction d'équation $aA + bB \rightarrow cC + dD$ est d'ordre 1 par rapport à A si :

Temps de demi-réaction $t_{1/2}$ indépendant de la concentration initiale $[A]_0$

Vitesses volumiques proportionnelles à $[A]_t$
 $v_{\text{disp}}(A)_t = k_1 \times [A]_t$ et $v_{\text{app}}(C)_t = k_2 \times [A]_t$

Loi exponentielle :
 $[A]_t = [A]_0 \times \exp(-k \times t)$

5

Modélisation microscopique de l'évolution d'un système

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 2. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation | |
|---|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| A) Suivre et modéliser l'évolution temporelle d'un système siège d'une transformation chimique | |
| Modélisation microscopique Mécanisme réactionnel : acte élémentaire, intermédiaire réactionnel, formalisme de la flèche courbe. Modification du mécanisme par ajout d'un catalyseur. Interprétation microscopique de l'influence des facteurs cinétiques. | À partir d'un mécanisme réactionnel fourni, identifier un intermédiaire réactionnel, un catalyseur et établir l'équation de la réaction qu'il modélise au niveau microscopique. Représenter les flèches courbes d'un acte élémentaire, en justifiant leur sens. Interpréter l'influence des concentrations et de la température sur la vitesse d'un acte élémentaire, en termes de fréquence et d'efficacité des chocs entre entités. |

Liens avec les programmes officiels de seconde et de première

| | Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|----------------------|--|--|--|
| SECONDE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Espèce chimique. Solvant, soluté. Masse, volume, masse volumique. Mélanges homogènes et hétérogènes. Quantités de matière. Concentration en masse. Transformation chimique, réaction chimique, équation. Espèce spectatrice, stœchiométrie, réactif limitant. Vitesse moyenne d'un point. Lumière blanche, lumière colorée, spectres d'émission. Capteurs électriques. | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> la quantité de matière d'une espèce ; la valeur d'une concentration en masse. Établir l'équation de réaction associée et l'ajuster. Citer des exemples : <ul style="list-style-type: none"> de corps purs et de mélanges homogènes et hétérogènes ; de capteurs. Mesurer une grandeur physique à l'aide d'un capteur. | <ul style="list-style-type: none"> $\rho = \frac{m}{V}$ $t = \frac{m}{V}$ Équation chimique. $v = \frac{MM'}{\Delta t}$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> Entités chimiques : molécules, atomes, ions. Nombre d'entités. Acidité due à la présence d'ions H⁺. | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> la masse d'une entité à partir de sa formule brute et de la masse de s atomes qui la composent ; le nombre d'entités et la quantité de matière (en mol) d'une espèce dans une masse d'échantillon. | <ul style="list-style-type: none"> $N = \frac{m}{m_{\text{entité}}}$ $n = \frac{N}{N_A}$ |

| PREMIÈRE | | | |
|---------------|---|--|--|
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Espèce chimique. Masse volumique, pression, température, masse molaire, volume molaire d'un gaz. Concentration en quantité de matière. Transformation modélisée par une réaction d'oxydoréduction. Évolution des quantités de matière lors d'une transformation. Absorbance, spectre d'absorption, couleur d'une espèce en solution, loi de Beer-Lambert. Titrage avec suivi colorimétrique. | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> la quantité de matière, la masse, la masse molaire, le volume d'une espèce ; la concentration en quantité de matière. Établir une équation de la réaction entre un oxydant et un réducteur. Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> le réactif limitant ; la composition d'un système dans l'état final. Déterminer la concentration d'un soluté à partir de données expérimentales relatives à l'absorbance. | <ul style="list-style-type: none"> $n = \frac{m}{M}$; $n = \frac{V}{V_m}$ $C = \frac{n}{V}$ Équation d'oxydo réduction, demi-équation électronique. $v_i = \frac{M_i M_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)}$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> Entités chimiques : molécules, atomes, ions. Transfert d'électrons. | Identifier le transfert d'électrons entre deux réactifs. | |
| TERMINALE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Masse volumique, température, pression, titre massique, densité. Facteurs cinétiques : température, concentration des réactifs. Catalyse, catalyseur. Équation d'état du gaz parfait. Vitesse volumique de disparition d'un réactif et d'apparition d'un produit, temps de demi-réaction. Loi de vitesse d'ordre 1. Absorbance ; loi de Beer-Lambert. Conductance, conductivité ; loi de Kohlrausch. Acide, base, pH. | <ul style="list-style-type: none"> Exploiter l'équation d'état du gaz parfait. Exploiter la loi de Beer-Lambert, la loi de Kohlrausch ou l'équation d'état du gaz parfait pour déterminer une concentration ou une quantité de matière. Établir l'équation d'une réaction acide-base. Mesurer le pH de solutions. Justifier le choix d'un capteur de suivi temporel de l'évolution d'un système. | <ul style="list-style-type: none"> Modèle du gaz parfait. $v_{app}(P)_t = \frac{d[P]}{dt}$ $v_{disp}(R)_t = -\frac{d[R]}{dt}$ $v_{disp}(A)_t = k_1 \times [A]_t$ $v_{app}(C)_t = k_2 \times [A]_t$ $[A]_t = [A]_0 \times \exp(-k \times t)$ $pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> Entités chimiques : molécules, atomes, ions. Mécanisme réactionnel : acte élémentaire, intermédiaire réactionnel. Transferts d'ion hydrogène H⁺. | <ul style="list-style-type: none"> Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. Interpréter la vitesse d'un acte élémentaire en fonction de la fréquence et de l'efficacité des chocs entre entités. | <ul style="list-style-type: none"> Chocs entre entités. Formalisme de la flèche courbe. Acte élémentaire. |

Activité 1

numérique Des entités en interaction p. 94

Capacité exigible

- Interpréter l'influence des concentrations et de la température sur la vitesse d'un acte élémentaire, en termes de fréquence et d'efficacité des chocs entre entités.

Analyse des documents

- Le mouvement brownien des grains de pollen a pour origine les chocs des molécules d'eau sur les grains.
 - Un choc efficace est un choc qui conduit effectivement à la formation des entités produits.
 - L'augmentation de température va augmenter la vitesse des particules. Le mouvement brownien sera donc modifié.
- L'augmentation de température va augmenter la fréquence des chocs entre entités réactives, et donc également augmenter la fréquence des chocs efficaces.
 - Si les concentrations des réactifs augmentent, la fréquence des chocs entre entités réactives et donc celles des chocs efficaces va augmenter aussi.

Simulation numérique

- La modification du programme doit montrer que si l'efficacité des chocs est augmentée (respectivement diminuée), la vitesse de réaction est augmentée (respectivement diminuée). Il faut ici jouer

sur la ligne 6 du programme : en augmentant la valeur donnée à collision AB l'efficacité des chocs entre entités réactives diminue.

Un pas vers le cours

- Si on augmente la température, la vitesse des particules augmente, la fréquence des chocs entre entités réactives augmente, la fréquence des chocs efficaces entre elles augmente aussi, et donc la vitesse de disparition des réactifs augmente.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Cette première activité permet d'introduire la notion de fréquence de chocs et celle de chocs efficaces. Elle est la première activité qui fait le lien entre la modélisation de la transformation chimique par la réaction chimique au niveau macroscopique et sa modélisation au niveau microscopique. Il faut bien faire attention au niveau du vocabulaire : il ne s'agit plus d'espèces chimiques mais d'entités. La partie analyse des documents peut être réalisée en autonomie à la maison. La partie simulation numérique peut également être réalisée en autonomie à la maison si les élèves disposent de Python chez eux.

Ressource pour le professeur à télécharger : Fichier Python

Activité 2

expérimentale Catalyse et mécanisme réactionnel p. 95

Capacité exigible

- À partir d'un mécanisme réactionnel fourni, identifier un intermédiaire réactionnel, un catalyseur, et établir l'équation de la réaction qu'il modélise au niveau microscopique.

Matériel :

- Deux béchers de 50 mL.
- Éprouvette graduée de 10 mL.
- Pipette jaugée de 2,0 mL.
- Propipette.
- Spectrophotomètre avec 3 cuves.
- Bain thermostaté à 50 °C.
- Chronomètre.

Consommables :

- Solution de sel de Seignette de concentration 0,2 mol · L⁻¹.
- Eau distillée.
- Solution de chlorure de cobalt II de concentration 0,15 mol · L⁻¹.
- Solution de peroxyde d'hydrogène de concentration 2 mol · L⁻¹.

Analyse des documents

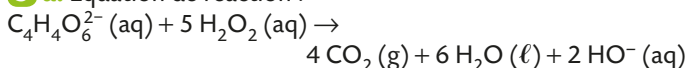
1 a. Un catalyseur est une espèce qui accélère une réaction chimique. Au cours de la transformation, il est consommé puis régénéré, sa formule n'apparaît donc pas dans l'équation de la réaction.

b. Dans un mécanisme réactionnel, le catalyseur permet de transformer les réactifs en produits via la formation d'intermédiaires réactionnels. Le catalyseur est régénéré à la fin du processus, qui peut donc recommencer : on parle alors de cycle catalytique.

Pratique expérimentale

2 Manipulation.

3 a. Équation de réaction :



Activité 3

documentaire Formalisme des flèches courbes p. 96

Capacités exigibles

- À partir d'un mécanisme réactionnel fourni, identifier un intermédiaire réactionnel, un catalyseur et établir l'équation de la réaction qu'il modélise au niveau microscopique.
- Représenter les flèches courbes d'un acte élémentaire, en justifiant leur sens.

Analyse des documents

1 a. • Étape 1 : l'électronégativité de O étant supérieure à celle de C, la liaison C=O est polarisée et O est donc porteur d'une charge partielle $-q$. De plus, l'oxygène porte des doublets non liants. O est donc bien un site donneur.

H⁺ est porteur d'une lacune électronique, c'est donc bien un site accepteur.

• Étape 2 : l'électronégativité de O étant supérieure à celle de C, la liaison C=O est polarisée et C est donc porteur d'une charge partielle $+q$. C est donc un site accepteur.

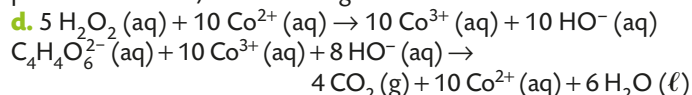
b. La réaction est lente car on n'observe pas de dégagement gazeux, signe de production du CO₂.

c. La solution est rose au début de la réaction : le cobalt est sous forme Co²⁺ (aq).

En cours de réaction, la solution est verte : le cobalt est sous forme Co³⁺ (aq).

En fin de réaction, la solution est à nouveau rose : le cobalt est sous forme Co²⁺ (aq).

On peut donc supposer que les ions Co²⁺ sont un catalyseur de la réaction : ils permettent d'accélérer la formation des produits à partir des réactifs, et ils sont régénérés en fin de réaction.



4 L'absorbance de la solution à la fin de la réaction est la même qu'au début. Cela prouve que la quantité d'ions Co²⁺ (aq) est la même, ce qui confirme que l'espèce a été régénérée.

Un pas vers le cours

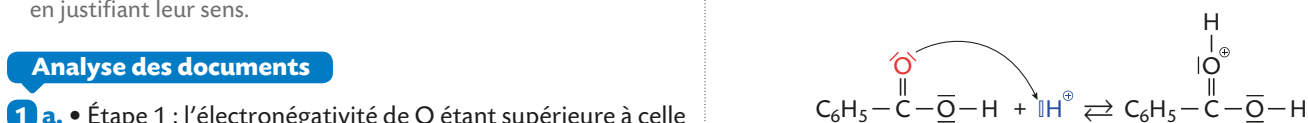
5 Un catalyseur accélère une réaction en modifiant le mécanisme réactionnel. Il remplace un ou des étapes lentes par des étapes rapides. Il est consommé puis totalement régénéré.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

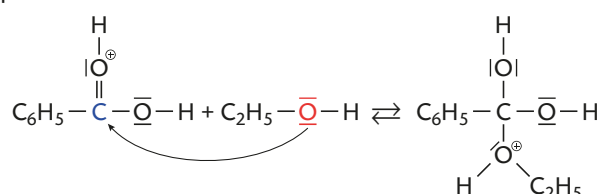
Dans le milieu réactionnel, les ions Co²⁺ et Co³⁺ sont en fait complexés par les ions tartrates. Nous avons choisi de ne pas parler aux élèves de la structure de ces espèces.

Expérimentalement, à 50 °C, la réaction semble achevée au bout de 8 min environ. Il est possible de bloquer l'évolution du système par une trempe au bout de 2 min environ : la solution est bien verte. Il est alors possible de tracer rapidement le spectre d'absorption du complexe contenant les ions Co³⁺.

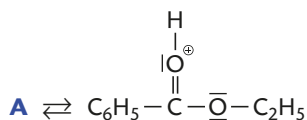
Le suivi cinétique de la réaction par spectrophotométrie est délicat en raison des bulles de gaz produites.



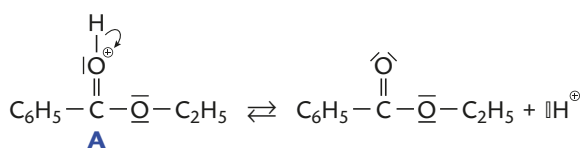
Étape 2 :



c.



d.



2 Les ions H^+ catalysent la réaction car ils sont consommés dans l'étape 1 puis régénérés dans l'étape 5. De plus, en leur présence, le mécanisme est modifié.

Les deux espèces présentes dans l'étape 3 sont des intermédiaires réactionnels.

Un pas vers le cours

3 L'entité qui est d'abord consommée dans le mécanisme réactionnel puis totalement régénérée est le catalyseur.

Pour établir l'équation de la réaction, il faut identifier dans le mécanisme réactionnel les intermédiaires réactionnels et le catalyseur car ils ne figurent pas dans l'équation de la réaction. Il faut ensuite placer à gauche de la flèche les entités réactives et à

droite les entités produits, puis préciser les états physiques des espèces correspondantes. Enfin, il faut vérifier la conservation des éléments et de la charge.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

- La notion de mécanisme réactionnel a déjà été abordée dans l'activité 2. On la précise ici en introduisant le modèle des flèches courbes, représentant le basculement des doublets d'électrons. La difficulté ici pour les élèves est d'une part d'identifier les sites donneurs et accepteurs de doublets mis en jeu dans l'étape du mécanisme considérée, d'autre part d'identifier dans les entités produites les origines des différentes parties, et enfin de relier ces modifications de structures aux basculements des doublets. L'utilisation de modèles moléculaires peut être une aide dans cet apprentissage.

- La représentation des lacunes électroniques est également importante : elle permet de justifier qu'une entité peut être acceptrice de doublets d'électrons.

- L'identification du catalyseur est liée au fait que celui-ci est consommé puis **totalem**ent régénéré. Inversement, un intermédiaire réactionnel est produit puis **totalem**ent consommé. Sinon, il s'agit d'un réactif ou d'un produit de la réaction.

Capsule vidéo de cours : Mécanisme réactionnel
Capsule vidéo complémentaire : Le mouvement brownien

QCM

p. 101

1. A et C ; 2. A, B et C ; 3. A et B ; 4. B ; 5. A et B ; 6. C ; 7. A et B ; 8. A ; 9. A et C ; 10. A et B ; 11. C.

Exercices

Appliquer le cours p. 104

3 Identifier des mélanges réactionnels

Les chocs et les chocs efficaces sont plus nombreux dans le mélange 2 ; c'est le mélange qui a la température la plus élevée.

4 Modéliser un mélange réactionnel

1. À une température plus élevée, on représente le même nombre de boules, mais le nombre de chocs efficaces étant plus élevé, on modélise plus de chocs entre entités et plus de chocs efficaces (« flashes ») entre boules grises et bleues.

2. Si on augmente la concentration en cuivre, le nombre de sphères bleues est plus élevé ainsi que le nombre de chocs entre entités et de chocs efficaces (« flashes ») entre boules grises et bleues.

3. Dans les deux cas, si on augmente le nombre de chocs efficaces, on obtient plus de produit donc la réaction va plus vite.

5 Écrire une équation de réaction

1. HIO est l'intermédiaire réactionnel.

2. $2 \text{HI} (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}_2 (\text{aq}) \rightarrow \text{I}_2 (\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\ell)$

6 Compléter un mécanisme réactionnel

(1) $(\text{CH}_3)_3\text{CBr} \rightleftharpoons (\text{CH}_3)_3\text{C}^+ + \text{Br}^-$

(2) $(\text{CH}_3)_3\text{C}^+ + \text{HO}^- \rightarrow (\text{CH}_3)_3\text{COH}$

7 Identifier un catalyseur

1. Dans le mécanisme 2 : ils sont consommés à l'étape 1 puis régénérés à l'étape 3.

2. Réaction 1 : $(\text{CH}_3)_3\text{CCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_3)_3\text{COH} + \text{Cl}^- + \text{H}^+$

Réaction 2 : $2 \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$

8 Comprendre le mode d'action d'un catalyseur

1. Étape 1 : $\text{H}_2\text{O}_2 + 2 \text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons 2 \text{Fe}^{2+} + 2 \text{H}^+ + \text{O}_2$

Étape 2 : $2 \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 + 2 \text{H}^+ \rightleftharpoons 2 \text{Fe}^{3+} + 2 \text{H}_2\text{O}$

2. Ce mécanisme en deux étapes rend la réaction plus rapide si ces étapes sont plus rapides que la réaction directe.

3. $2 \text{H}_2\text{O}_2 (\ell) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (\ell) + \text{O}_2 (\text{g})$

9 Repérer des sites donneurs ou accepteurs

1. 2. Pour l'iodométhane :

C-I polarisée : C (site accepteur) et I (site donneur).

Pour le méthanol :

C-O et O-H polarisées : C, H (sites accepteurs) et O (site donneur).

10 Justifier la présence de sites donneurs ou accepteurs

1. Pour l'éthanal :

- grande différence d'électronégativité entre C et O et donc liaisons C-O polarisée : C^{+q} et O^{-q} ;

- le site donneur est donc l'atome d'oxygène O, riche en électrons. Le site accepteur est l'atome de carbone C.

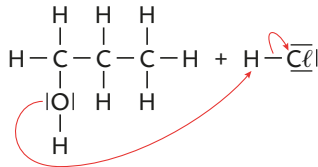
Pour l'éthanamine :

- grande différence d'électronégativité entre C et N et donc liaisons C-N polarisée : C^{+q} et N^{-q} ;

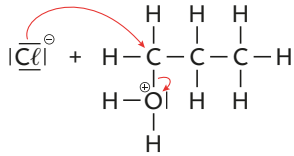
- le site donneur est donc l'atome d'azote N, riche en électrons. Le site accepteur est l'atome de carbone C.

11 Modéliser un déplacement de doublet

a



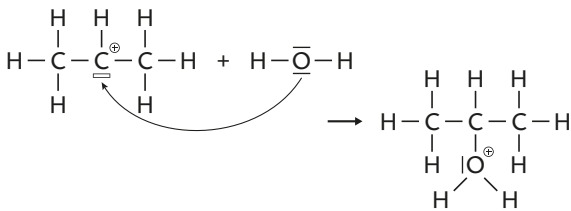
b



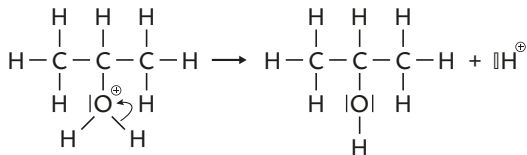
12 Justifier le sens d'une flèche courbe

1. a. La flèche courbe part du site accepteur (C^+) vers le site donneur (O) : c'est une erreur, il faut faire l'inverse.

b.



2.



Exercices

S'entraîner

p. 106

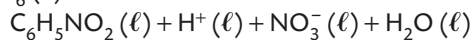
13 Nitration du benzène

1. Intermédiaires réactionnels : ce sont des espèces formées puis consommées totalement.

Mécanisme 1 : $H_2NO_3^+$, NO_2^+ , $C_6H_6NO_2^+$

Mécanisme 2 : $H_2NO_3^+$, NO_2^+ , $C_6H_6NO_2^+$

2. $2 HNO_3(\ell) + C_6H_6(\ell) \rightarrow$



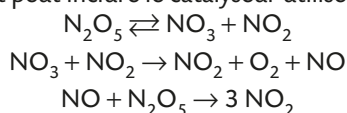
3. a. L'acide sulfurique H_2SO_4 est consommé à la première étape et régénéré totalement à la quatrième étape : c'est donc un catalyseur.

b. Les étapes (2) et (3) des deux mécanismes sont les mêmes. Les mécanismes se différencient par les étapes (1) et (4). D'une part, l'étape la plus lente (étape (1)) du mécanisme 1 a été modifiée dans le mécanisme 2 et l'étape (3), identique aux deux mécanismes, est l'étape la plus lente du mécanisme 2 : on peut donc supposer que la nitration du benzène est plus rapide avec la deuxième voie de synthèse. La cinétique de la réaction a donc été modifiée en modifiant le mécanisme réactionnel.

14 Step by step

Traduction :

Un mécanisme réactionnel est une succession pas à pas d'actes élémentaires par lesquels la réaction chimique se produit. Cela décrit chaque intermédiaire réactionnel (souvent instable et de courte durée de vie) et peut inclure le catalyseur utilisé. Par exemple :



1. Identifier les intermédiaires réactionnels.

2. Y a-t-il un catalyseur dans ce mécanisme ?

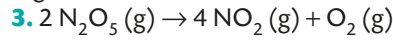
3. En déduire l'équation de la réaction. Les réactifs et les produits sont gazeux.

Réponses

1. Les intermédiaires réactionnels sont les espèces produites puis consommées totalement : NO_3 , NO .

Attention : NO_2 n'est pas un intermédiaire réactionnel mais un produit.

2. Il n'y a pas de catalyseur : aucune espèce n'est consommée puis régénérée totalement.



15 À chacun son rythme

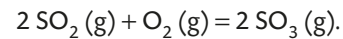
Décomposition thermique

1. L'intermédiaire réactionnel est NO .

2. Le catalyseur est NO_2 .

3. Les réactifs sont donc SO_2 et O_2 et le produit est SO_3 .

4. Il faut multiplier par deux les nombres stœchiométriques dans le premier acte élémentaire afin de retrouver l'équation de la réaction :

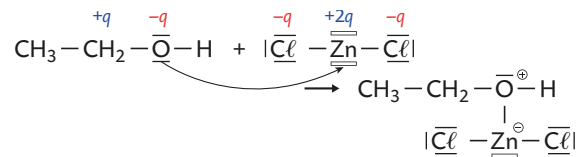


C'est la difficulté de l'exercice.

16 Connaître les critères de réussite

Synthèse du chloroéthane

L'atome d'oxygène O est plus électronégatif que l'atome de carbone C et il porte des doublets non liants ; c'est donc le site donneur. L'atome de Zn est moins électronégatif que l'atome de chlore Cl et il porte des lacunes électroniques, donc c'est le site accepteur.



17 Résolution de problème

La fraîcheur d'un lait

Des pistes de résolutions peuvent être fournies par le professeur : S'approprier

• Lorsque la concentration en acide lactique atteint un certain seuil (que l'on peut noter C_1), le lait tourne. Cette valeur est la même à $28^\circ C$ et à $5^\circ C$.

• La température apparaît dans l'expression $\exp\left(-\frac{E_a}{R \times T}\right)$; elle nous permet de calculer la valeur de la constante k , qui elle-même apparaît dans la loi exponentielle : $C = C_0 \times \exp(-k \times t)$.

Analyser

• On ne connaît pas la valeur C_0 de la concentration initiale en lactose ; il faut donc, à partir des lois exponentielles, s'affranchir de cette valeur en posant une égalité.

• Exprimer les constantes k_1 et k_2 pour $T_1 = 28^\circ C$ et $T_2 = 5^\circ C$ à partir de l'expression :

$$k = A \times \exp\left(-\frac{E_a}{R \times T}\right) \text{ puisqu'il est dit dans l'énoncé que la constante}$$

$$k \text{ est proportionnelle à } \exp\left(-\frac{E_a}{R \times T}\right).$$

• A est une constante ; c'est la même valeur à $28^\circ C$ et $5^\circ C$.

Réaliser

• Montrer que $k_1 \times t_1 = k_2 \times t_2$.

• L'énergie d'activation est la même à $28^\circ C$ et à $5^\circ C$.

• Exprimer la température en kelvin (K).

Une démarche attendue de résolution par l'élève peut être la suivante :

1^{re} étape : Bien comprendre la question posée

1. Comment évolue la concentration en lactose au cours du temps ?
2. À partir de quelle concentration en acide lactique produit peut-on dire que le lait a tourné ?
3. Que nous permet de calculer l'information : à 28 °C, un lait cru tourne en 4 heures ?
4. La durée de dégradation sera-t-elle plus ou moins longue au réfrigérateur et pourquoi ?
5. Quelle est la température du réfrigérateur ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. La concentration en lactose du lait au cours du temps suit une loi exponentielle : $C = C_0 \times \exp(-k \times t)$ où k est une constante.
2. Ce n'est pas indiqué dans les données.

Remarque : de nouvelles questions peuvent alors apparaître après avoir répondu à cette question 2 :

2bis. Peut-on accéder à cette concentration ?

On ne dispose pas de l'équation de la réaction ni des formules chimiques des espèces ; on ne peut donc pas avoir la relation entre la concentration en lactose et celle en acide lactique.

2ter. Quelle est la concentration initiale en lactose du lait cru ?

On ne dispose pas de cette information.

3. La température apparaît dans l'expression $\exp\left(-\frac{E_a}{R \times T}\right)$; elle

nous permet de calculer la valeur de la constante k , qui elle-même apparaît dans la loi exponentielle : $C = C_0 \times \exp(-k \times t)$.

4. La température étant un facteur cinétique, la durée de dégradation devrait être plus rapide au réfrigérateur.

5. La température du réfrigérateur est de 5 °C.

3^e étape : Dégager la problématique

Calculer la durée de la dégradation du lactose en acide lactique, à une température de 5 °C.

4^e étape : Construire la réponse

- Exprimer la concentration C_1 en lactose lorsque le lait tourne, à 28 °C et à 5 °C.
- Exprimer les constantes k_1 et k_2 pour $T_1 = 28$ °C et $T_2 = 5$ °C.
- En déduire l'expression de la durée t_2 en fonction de t_1 et la calculer.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

Le lactose du lait cru se dégrade lentement en acide lactique. Lorsque la concentration en acide lactique devient significative, le lait tourne. À 25 °C, il tourne en 4 heures. On cherche à savoir la durée de ce phénomène à une température de 5 °C.

- Mettre en forme la réponse.

On note C_1 la concentration en acide lactique au bout d'une durée t_1 , à la température $\theta_1 = 28$ °C ($T_1 = 301,15$ K). Cette concentration est la même lorsque le lait tourne au bout d'une durée t_2 , au réfrigérateur à la température $\theta_2 = 5$ °C ($T_2 = 278,15$ K) :

$$C_1 = C_0 \times \exp(-k_1 \times t_1) = C_0 \times \exp(-k_2 \times t_2)$$

$$\text{Donc : } \exp(-k_1 \times t_1) = \exp(-k_2 \times t_2)$$

On sait que $\ln(\exp(x)) = x$, donc :

$$\ln(\exp(-k_1 \times t_1)) = \ln(\exp(-k_2 \times t_2)) \Rightarrow k_1 \times t_1 = k_2 \times t_2$$

On cherche k_1 et k_2 :

$$k_1 = A \times \exp\left(-\frac{E_a}{R \times T_1}\right) \text{ et } k_2 = A \times \exp\left(-\frac{E_a}{R \times T_2}\right) ; \text{ donc :}$$

$$k_1 \times t_1 = k_2 \times t_2$$

$$A \times \exp\left(-\frac{E_a}{R \times T_1}\right) \times t_1 = A \times \exp\left(-\frac{E_a}{R \times T_2}\right) \times t_2$$

D'où :

$$t_2 = \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{RT_1}\right)}{\exp\left(-\frac{E_a}{RT_2}\right)} \times t_1 = \frac{\exp\left(-\frac{75,1 \times 10^3}{8,314 \times 301,15}\right)}{\exp\left(-\frac{75,1 \times 10^3}{8,314 \times 278,15}\right)} \times 4 = 48 \text{ h}$$

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

Au réfrigérateur, un lait tourne en 48 heures. Il faut donc consommer assez rapidement un lait cru.

18 Synthèse de l'ammoniac

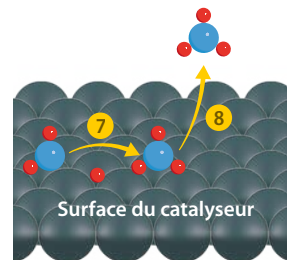
1. Les intermédiaires réactionnels sont formés puis consommés totalement : N_{2ads} , N_{ads} , H_{2ads} , H_{ads} , NH_{ads} , NH_{2ads} , NH_{3ads}

2. L'étape (2) est la plus lente, donc c'est sur cette étape qu'il faut agir pour accélérer la réaction.

3. a. Le solide modifie le mécanisme réactionnel : des sites permettent l'adsorption des entités et le nombre d'actes élémentaires est augmenté ; en outre, le solide n'est pas consommé. C'est donc bien un catalyseur.

b. En augmentant la surface du catalyseur, on permet à plus d'entités de s'adsorber ; on augmente ainsi le nombre d'actes élémentaires. L'utilisation de catalyseur finement divisé rend donc la réaction plus rapide.

4.



5. La réaction est faite à haute température et haute pression. Ceci est certainement dû au fait qu'on maximise ainsi la quantité de chocs efficaces entre entités réactives, et entre entités réactives et catalyseur.

$$6. \frac{v_2(\text{cata})}{v_1(\text{sans cata})} = \frac{\exp\left(-\frac{E_{a2}}{R \times T}\right)}{\exp\left(-\frac{E_{a1}}{R \times T}\right)} = \exp\left(\frac{E_{a1} - E_{a2}}{R \times T}\right)$$

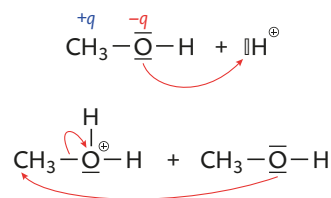
$$= \exp\left(\frac{350 \times 10^3 - 162 \times 10^3}{8,314 \times 973,15}\right)$$

$$= \exp(23,2) = 1,2 \times 10^{10}$$

La vitesse est donc considérablement augmentée !

19 Un biocarburant

1. a.



b. Étape 1 : vu la différence d'électronégativité entre C et O, c'est O l'atome donneur qui attaque le proton H^+ , accepteur de par sa lacune électronique.

Étape 2 : vu la différence d'électronégativité entre C et O, c'est O l'atome donneur du méthanol qui attaque l'intermédiaire réactionnel (IR) formé à l'étape 1. Cet IR possède une liaison C-O fortement polarisée à cause de la différence d'électronégativité entre C et O, et ceci est amplifié par la charge positive portée par l'atome d'oxygène. Le site accepteur qui est attaqué est donc l'atome de carbone. Le doublet de la liaison C-O retourne donc sur l'oxygène et permet ainsi le départ de la molécule d'eau.

2. Étape 3 : $\text{CH}_3-\bar{\text{O}}-\text{CH}_3$ et H^{\oplus}
 3. Les ions hydrogène sont consommés à l'étape 1 et régénérés à l'étape 3.
 4. Équation de la réaction :

$$2 \text{CH}_3-\text{O}-\text{H} \rightarrow \text{CH}_3-\text{O}-\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$$
 La température est un facteur cinétique.

5. Une augmentation de température augmente la vitesse de réaction.

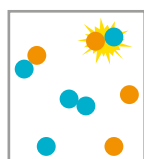
Vers le Bac

p. 108

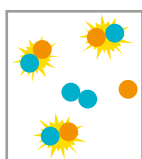
Préparation à l'écrit

20 Synthèse d'un explosif

- (1) $\text{Cl}_2 + \text{AlCl}_3 \rightleftharpoons \text{Cl}^+ + \text{AlCl}_4^-$
 (2) $\text{C}_6\text{H}_6 + \text{Cl}^+ \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_6\text{Cl}^+$
 (3) $\text{C}_6\text{H}_6\text{Cl}^+ \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_5\text{Cl} + \text{H}^+$
 (4) $\text{AlCl}_4^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{AlCl}_3 + \text{HCl}$
- Le trichlorure d'aluminium AlCl_3 est le catalyseur ; il est consommé dans l'étape (1) et régénéré totalement dans l'étape (4).
- a. Le deuxième produit de la réaction est l'acide chlorhydrique HCl .
 b. $\text{C}_6\text{H}_6(\text{l}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}(\text{l}) + \text{HCl}(\text{g})$
- a. Une augmentation de température va augmenter la fréquence des chocs, et donc celle des chocs efficaces. La vitesse de la réaction va donc augmenter.
 b. Le nombre de chocs efficaces augmente lorsque la température augmente :



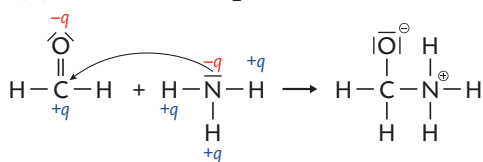
Modélisation du mélange réactionnel à 25 °C



Modélisation du mélange réactionnel à 55 °C

21 Origine de la vie dans l'espace

- a. L'atome d'azote N est le site donneur dans la molécule d'ammoniac NH_3 .
 L'atome de carbone C est le site accepteur dans la molécule de méthanal CH_2O .
 Le site donneur (N) de l'ammoniac NH_3 interagit avec le site accepteur (C) du méthanal CH_2O .



- a. A est consommé puis régénéré totalement, c'est donc un catalyseur.
 A est l'ion hydrogène H^+ .
 b. La liaison O-H est polarisée en raison de la différence d'électronégativité entre les atomes d'hydrogène H et d'oxygène O. Cette liaison se casse et le doublet va sur l'atome le plus électro-négatif : l'oxygène.

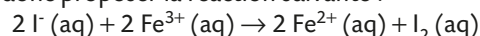
Préparation à l'ECE

- L'ajout des ions fer (II) $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ dans le bécher (a) a permis d'obtenir une solution jaune-orangée plus intense que celle du bécher (b), prouvant ainsi une formation plus rapide du diiode $\text{I}_2(\text{aq})$. Les ions fer (II) $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ ont donc permis une réaction rapide entre les ions peroxodisulfate et iodure. Il a donc joué le rôle de catalyseur.
- Tube (a) : formation d'un précipité rouge. Cela traduit la présence d'ions fer (III) $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$.
 On peut donc proposer la réaction suivante :

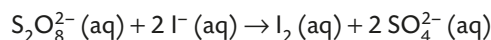
$$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}(\text{aq}) + 2 \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 2 \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$$

Tube (b) : phase organique violette. Cela traduit la présence de diiode I_2 .

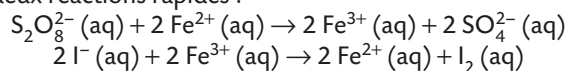
On peut donc proposer la réaction suivante :



- L'introduction des ions fer (II) a donc remplacé une réaction lente :



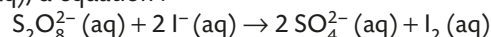
par deux réactions rapides :



- La catalyse a modifié le mécanisme puisqu'elle a remplacé une réaction lente par deux réactions rapides.

Sujet complet fourni dans la version numérique :

On étudie la réaction entre les ions iodure $\text{I}^-(\text{aq})$ et peroxodisulfate $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}(\text{aq})$, d'équation :



On souhaite montrer que le mécanisme d'une réaction peut être modifié lorsqu'elle est catalysée.



Produits et matériel mis à disposition :

- Solution de peroxodisulfate de potassium de concentration $0,20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions peroxodisulfate $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}(\text{aq})$.
- Solution d'iodure de potassium de concentration $0,20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions iodure $\text{I}^-(\text{aq})$.
- Solution de sulfate de fer (II) de concentration $0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions fer (II) $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$.
- Solution de chlorure de fer (III) de concentration $0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions fer (III) $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$.
- Solution d'hydroxyde de sodium $\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$.
- Deux béchers de 50 mL, deux agitateurs en verre, deux tubes à essais, des pipettes pasteur, deux pipettes jaugées de 20,0 mL, une propipette.

Données

- $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}(\text{aq}) / \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$; $\text{I}_2(\text{aq}) / \text{I}^-(\text{aq})$; $\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) / \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$
- Une solution contenant des ions iodure ou des ions peroxodisulfate est incolore.
- Le diiode colore en jaune une solution aqueuse qui le contient et en rose le cyclohexane.

- Tests d'identification des ions :

| Ion testé | Fer (II) Fe^{2+} (aq) | Fer (III) Fe^{3+} (aq) |
|------------------|---|---|
| Réactif utilisé | Solution d'hydroxyde de sodium Na^+ (aq) + HO^- (aq) | |
| Résultat du test |  |  |

Mise en œuvre d'un protocole expérimental **RÉA** (10 min)

Protocole expérimental 1 :

- Dans deux béchers **a** et **b**, verser 20,0 mL de la solution de peroxydisulfate de potassium 2K^+ (aq) + $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (aq).
- Au contenu du bécher **a**, ajouter 0,5 mL de la solution de sulfate de fer (II) Fe^{2+} (aq) + SO_4^{2-} (aq).
- Mélanger.
- Dans les deux béchers, verser en même temps 20,0 mL de la solution d'iodure de potassium K^+ (aq) + I^- (aq).

1. Mettre en œuvre le protocole expérimental ci-dessus.
2. À partir des observations effectuées lors de la mise en œuvre du protocole, déterminer le rôle des ions fer (II) Fe^{2+} (aq). Justifier.

APPEL FACULTATIF : Appeler le professeur en cas de difficulté lors de la mise en œuvre du protocole expérimental.

Élaborer d'un protocole expérimental **ANA-RAIS** (15 min)

3. Avec le matériel et les produits disponibles, et en utilisant les données, élaborer un protocole expérimental permettant de montrer que :
 - les ions fer (II) Fe^{2+} (aq) peuvent réagir avec les ions peroxydisulfate et former des ions fer (III) Fe^{3+} (aq) ;
 - les ions fer (III) Fe^{3+} (aq) peuvent oxyder les ions iodure I^- (aq) en diiode I_2 (aq).
- Les expériences seront réalisées dans des tubes à essai.

APPEL N° 1 : Appeler le professeur pour lui présenter le protocole expérimental proposé ou en cas de difficulté.

Mise en œuvre du protocole expérimental **RÉA** (10 min)

4. Mettre en œuvre le protocole expérimental.

APPEL FACULTATIF : Appeler le professeur en cas de difficulté lors de la mise en œuvre du protocole expérimental.

Analyse des résultats **VAL** (25 min)

5. Écrire les équations des réactions mises en jeu.
6. Justifier que l'introduction des ions fer (II) dans le bécher A revient à remplacer une réaction lente par deux réactions successives plus rapides.
7. La catalyse a-t-elle modifié le mécanisme réactionnel ?

APPEL N° 2 : Appeler le professeur pour lui présenter le résultat de l'étude cinétique ou en cas de difficulté.

Vers l'oral

p. 110

Mémoriser sa présentation

- Créer des flashcards.
- La fiche de mémorisation.
- Le sketchnote.

Remarque : Expliquer aux élèves que ce travail doit être accompagné d'une planification des reprises car l'acquisition d'une mémoire à long terme est une condition essentielle pour comprendre, élaborer des connexions mentales, tisser des liens... Donc, la réactivation est essentielle. Il faut définir un calendrier de reprises, en espaçant peu à peu le temps entre les reprises. Le calendrier de reprise peut être calculé sur la base du 1, 2, 4, 8. Par exemple : notion 1 vue le premier jour, reprise le second, reprise le quatrième, reprise le huitième, etc.

À deux, c'est mieux

Évaluation orale n° 1 et n° 2

La synthèse du 2-chloropropane est faite en deux étapes à partir de propène et de chlorure d'hydrogène. Dans la première étape, le **doublet non-liant** du propène est un **site donneur** de **doublet d'électrons**. Il interagit avec l'atome d'hydrogène du chlorure d'hydrogène. En effet, dans la molécule de chlorure d'hydrogène, l'atome d'hydrogène H est moins électro-négatif que l'atome de chlore Cl ; c'est donc un **site accepteur** de **doublet d'électrons**. Il s'en suit la formation d'une **liaison covalente** C-H dans le carbocation et d'une **lacune électronique** sur l'atome de carbone central. Un ion chlorure est alors formé à cause de la **rupture** du **doublet liant** de la molécule de chlorure d'hydrogène.

Dans la deuxième étape, un **doublet non-liant** de l'ion chlorure – **site donneur** de **doublet d'électrons** – interagit avec l'atome de carbone porteur d'une **lacune électronique** dans le carbocation. Cette lacune électronique est un **site accepteur** de **doublet d'électrons**. Il s'en suit la formation d'une **liaison covalente** C-Cl, permettant la formation du 2-chloropropane.

Je m'exprime à l'oral sur

La modélisation microscopique

- **Qu'est-ce qu'un acte élémentaire ?**
Processus qui se déroule à l'échelle microscopique, en une seule étape, sans formation d'entités intermédiaires.
- **Définir un intermédiaire réactionnel.**
Ensemble d'actes élémentaires.
- **Comment identifier un catalyseur dans un mécanisme réactionnel ?**
C'est l'entité consommée au cours d'un acte élémentaire puis totalement régénérée dans un autre.
- **Que modélise une flèche courbe ?**
Elle modélise l'interaction entre le site donneur et accepteur de doublet d'électrons des entités qui réagissent.

6

Évolution d'un système, siège d'une transformation nucléaire

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 2. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation | |
|---|--|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| B) Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation nucléaire | |
| <p>Décroissance radioactive Stabilité et instabilité des noyaux : diagramme (N, Z), radioactivité α et β, équation d'une réaction nucléaire, lois de conservation.</p> <p>Radioactivité γ.</p> <p>Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs ; constante radioactive ; loi de décroissance radioactive ; temps de demi-vie ; activité.</p> <p>Radioactivité naturelle ; applications à la datation. Applications dans le domaine médical ; protection contre les rayonnements ionisants.</p> | <p>Déterminer, à partir d'un diagramme (N, Z), les isotopes radioactifs d'un élément. Utiliser des données et les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire et identifier le type de radioactivité.</p> <p>Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs. Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive. Capacité mathématique : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.</p> <p>Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater un événement. Citer quelques applications de la radioactivité dans le domaine médical. Citer des méthodes de protection contre les rayonnements ionisants et des facteurs d'influence de ces protections.</p> |

Liens avec les programmes officiels de seconde et de première

| | Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|-----------------|---|--|---|
| SECONDE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Élément chimique. Énergie nucléaire. Énergie rayonnante. Transformation nucléaire. Équation de réaction nucléaire. Rayonnement gamma. | <ul style="list-style-type: none"> Identifier une transformation nucléaire. Établir une équation de réaction nucléaire. | |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> Noyau atomique. Nombre de masse A. Nombre de charges Z. Atomes ou ions isotopes. Atomes radioactifs. Positon. | | |
| PREMIÈRE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Émission de lumière par un atome. Fusion nucléaire. Fission nucléaire. Demi-vie d'un noyau radioactif. Nombre de noyaux radioactifs encore présents. Courbe de décroissance radioactive. | <ul style="list-style-type: none"> Identifier une fusion, une fission ou une désintégration radioactive à partir de l'équation de la réaction nucléaire. Calculer un nombre de noyaux radioactifs encore présents. | $N(n \times t_{1/2}) = \frac{N_0}{2^n}$ |

| | | | |
|------------------|---|--|--|
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Photon. • Niveaux d'énergie quantifiés. | | |
| TERMINALE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Stabilité et instabilité des noyaux. • Diagramme (N, Z). • Radioactivité α et β. • Équation d'une réaction nucléaire. • Lois de conservation. • Radioactivité γ. • Constante radioactive. • Loi de décroissance radioactive. • Temps de demi-vie. • Activité. • Radioactivité naturelle. • Datation. • Rayonnements ionisants. | <ul style="list-style-type: none"> • Déterminer, à partir d'un diagramme (N, Z), les isotopes radioactifs d'un élément. • Écrire l'équation d'une réaction nucléaire et identifier le type de radioactivité. • Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs. • Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive. • Expliquer le principe de la datation et dater un événement. • Citer des applications de la radioactivité dans le domaine médical, des méthodes de protection contre les rayonnements ionisants et des facteurs d'influence de ces protections. | $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$ $A(t) = \lambda N(t)$ $t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Positron. • Électron. • Particule α. • Photon γ. • Noyau père. • Noyau fils. | | |

Vu en première La transformation nucléaire

p. 112

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo de cours : Équation de réaction nucléaire



Flash test

1. B et C ; 2. A ; 3. C ; 4. C.

Activité 1 documentaire Instabilité et désintégration d'un noyau

p. 113

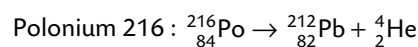
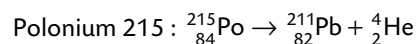
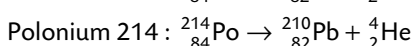
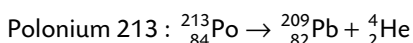
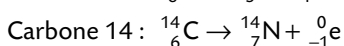
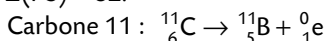
Capacités exigibles

- Déterminer, à partir d'un diagramme (N, Z), les isotopes radioactifs d'un élément.
- Utiliser des données et les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire et identifier le type de radioactivité.

Analyse des documents

- 1 a. Le carbone 12 et le carbone 13 sont des isotopes stables tandis que le carbone 11 et le carbone 14 sont instables.
b. Pour le carbone 11, il s'agit d'une radioactivité β^+ et pour le carbone 14, il s'agit d'une radioactivité β^- .
c. Les noyaux de polonium ont un excès de nucléons (protons et neutrons), ce qui explique pourquoi ils se désintègrent selon la radioactivité α .

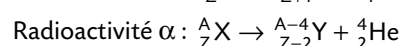
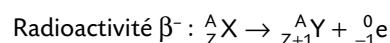
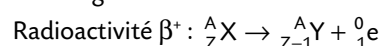
2 a. D'après le tableau périodique on trouve : $Z(\text{N}) = 7$; $Z(\text{B}) = 5$; $Z(\text{Pb}) = 82$.



- b. Le noyau formé a pour nom :
- pour la désintégration du carbone 11 : le bore 11 ;
 - pour la désintégration du carbone 14 : l'azote 14 ;
 - pour la désintégration du polonium 213 : le plomb 209 ;
 - pour la désintégration du polonium 214 : le plomb 210 ;
 - pour la désintégration du polonium 215 : le plomb 211 ;
 - pour la désintégration du polonium 216 : le plomb 212.

Un pas vers le cours

3 Pour chaque type de radioactivité, on écrit l'équation de désintégration nucléaire d'un noyau d'un élément chimique X, de numéro atomique Z et de nombre de masse A, conduisant à la formation d'un noyau d'un autre élément chimique Y. On doit respecter la conservation du nombre de masse A et du nombre de charge Z.



Capacité exigible

- Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater l'évènement.

Résolution de problème

1^{re} étape : Bien comprendre la question posée

- Quel est le rôle du carbone 14 ?
- Qu'est-ce que l'activité d'un échantillon radioactif ?
- Comment évolue cette activité au cours du temps ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

- L'activité du carbone 14 radioactif décroît dans l'échantillon de bois à partir de la mort de l'arbre.
- L'activité évolue selon une loi exponentielle.
- La demi-vie du carbone 14 est égale à 5 734 ans et est reliée à la constante de désintégration radioactive λ .
- Les fonctions exponentielle et logarithme népérien sont inverses l'une de l'autre.
- L'activité d'un gramme de carbone d'un bois vivant est égale à 816,0 Bq et celle d'un gramme de carbone du drakkar, découvert en 1997, est égale à 725,4 Bq.

3^e étape : Dégager la problématique

Déterminer la durée t au bout de laquelle l'activité d'un gramme de carbone est égale à 725,4 Bq, son activité initiale étant égale à 816,0 Bq, puis calculer la date à laquelle l'arbre dont est issu l'échantillon a été abattu, le drakkar ayant été découvert en 1997.

4^e étape : Construire la réponse

- Isoler la durée t à partir de l'expression de l'activité, en utilisant la fonction logarithme népérien.
- Exprimer la constante de désintégration radioactive λ en fonction de la demi-vie $t_{1/2}$.
- En déduire l'expression de la durée t en fonction de $A(t)$, A_0 et $t_{1/2}$.
- Calculer la valeur de t en années.
- En déduire la date à laquelle l'arbre a été abattu pour la construction du drakkar.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

Présenter le contexte et introduire la problématique. Pour connaître la date de construction du drakkar, il est nécessaire de déterminer la durée au bout de laquelle l'activité d'un gramme de carbone, due à la désintégration radioactive du carbone 14, passe d'une valeur initiale égale à 816,0 Bq à une valeur égale à 725,4 Bq.

- Mettre en forme la réponse.
- Isoler la durée t à partir de l'expression de l'activité.

L'expression de l'activité est :

$$A(t) = A_0 \times \exp(-\lambda \times t) \Leftrightarrow \exp(-\lambda \times t) = \frac{A(t)}{A_0}$$

- Appliquer la fonction logarithme népérien aux deux membres de l'égalité :

$$\ln(\exp(-\lambda \times t)) = \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) \Leftrightarrow -\lambda \times t = \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

$$\Leftrightarrow t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

- Exprimer la constante de désintégration radioactive λ en fonction de la demi-vie $t_{1/2}$.

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

- En déduire l'expression de la durée t en fonction de $A(t)$, A_0 et $t_{1/2}$.

$$t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) \Leftrightarrow t = -\frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

- Calculer la valeur de t en années.

$$t = -\frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = -\frac{5734}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{725,4}{816,0}\right) = 974 \text{ ans.}$$

En déduire la date à laquelle l'arbre a été abattu pour la construction du drakkar.

$$\text{Date} = 1997 - 974 = 1\ 023.$$

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

L'arbre a été abattu en l'an 1023 ap. J.-C.

Un pas vers le cours

- Pour dater un objet ancien contenant du carbone, on isole un gramme de carbone issu de l'objet et on en mesure l'activité à un temps t , notée $A(t)$. Cette activité suit une loi exponentielle :

$$A(t) = A_0 \times \exp(-\lambda \times t) = A_0 \times \exp\left(-\frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \times t\right)$$

λ est la constante de désintégration radioactive et $t_{1/2}$ est la demi-vie du carbone 14 (égale à 5 734 ans).

À partir de la connaissance de l'activité A_0 d'un gramme de carbone prélevé de la matière vivante, on peut calculer le temps t qui s'est écoulé entre la mesure actuelle et la date de fabrication de l'objet, en faisant comme hypothèse que celle-ci coïncide avec la mort de la matière vivante utilisée pour fabriquer l'objet.

$$t = -\frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------------|---|---|---|---|---|
| S'approprier | Extraire et organiser l'information : demi-vie du carbone 14, activité du carbone 14 dans le bois du drakkar, activité du carbone 14 dans le bois vivant. | | | | |
| Analyser-raisonner | Construire les étapes d'une résolution de problème : - Isoler la durée t à partir de l'expression de l'activité. - Exprimer la constante de désintégration radioactive en fonction de la demi-vie. - Trouver l'expression de la durée t en fonction de $A(t)$, A_0 et $t_{1/2}$. - Calculer la valeur de t en années. - Trouver la date à laquelle l'arbre a été abattu pour la construction du drakkar. | | | | |

| | | | | | |
|-------------|---|--|--|--|--|
| Réaliser | <ul style="list-style-type: none"> – Effectuer des calculs : isoler la durée t à partir de l'expression de l'activité puis faire intervenir dans l'expression la demi-vie du carbone 14. – Écrire un résultat de manière adapté (unités, chiffres significatifs) : donner t en année, à l'unité près. – Déterminer la date de la construction. | | | | |
| Communiquer | Rédiger une conclusion. | | | | |

Capsules vidéos de cours :

- Équation de réaction nucléaire
- Datation

QCM

p. 119

1. A et B ; 2. A et B ; 3. B ; 4. B ; 5. C ; 6. A ; 7. A et C ; 8. B ; 9. B et C ; 10. B.

Exercices

Appliquer le cours

p. 122

3 Reconnaître des particules

Électron = ${}_{-1}^0\text{e}$; positon = ${}_{+1}^0\text{e}$; noyau d'hélium 4 = ${}_{2}^4\text{He}$.

4 Identifier une particule

Le noyau de plutonium perd 4 nucléons en se désintégrant en un noyau d'uranium, la particule possède donc 4 nucléons. De plus, elle possède une charge électrique +2e. C'est donc un noyau d'hélium 4 : ${}_{2}^4\text{He}$.

5 Utiliser les lois de conservation (1)

1. Conservation du nombre de masse A et du nombre de charges Z .

2.a. ${}_{82}^{189}\text{Pb} \rightarrow {}_{81}^{189}\text{Tl} + {}_{+1}^0\text{e}$ (positon)

b. ${}_{90}^{210}\text{Th} \rightarrow {}_{88}^{206}\text{Ra} + {}_{2}^4\text{He}$ (noyau d'hélium 4)

c. ${}_{5}^{13}\text{B} \rightarrow {}_{6}^{13}\text{C} + {}_{-1}^0\text{e}$ (électron)

6 Utiliser les lois de conservation (2)

${}_{82}^{186}\text{Pb} \rightarrow {}_{80}^{182}\text{Hg} + {}_{2}^4\text{He}$

7 Écrire une équation de réaction nucléaire

${}_{84}^{211}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{207}\text{Pb} + {}_{2}^4\text{He}$

8 Écrire une équation de réaction nucléaire

Si Z est le nombre de charges d'un noyau père, alors le noyau fils a pour nombre de charges $Z + 1$ (si radioactivité β^-), $Z - 1$ (si radioactivité β^+) ou $Z - 2$ (si radioactivité α). En analysant les étiquettes proposées, on peut alors associer les noyaux fils aux noyaux pères correspondant, puis écrire les équations de désintégration suivantes :

${}_{82}^{200}\text{Pb} \rightarrow {}_{81}^{200}\text{Tl} + {}_{+1}^0\text{e}$

${}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + {}_{2}^4\text{He}$

${}_{7}^{17}\text{N} \rightarrow {}_{8}^{17}\text{O} + {}_{-1}^0\text{e}$

9 Déterminer un type de radioactivité

1. ${}_{15}^{32}\text{P} \rightarrow {}_{16}^{32}\text{S} + {}_{-1}^0\text{e}$

2. C'est une radioactivité β^- .

10 Identifier un type de radioactivité

Le noyau de polonium perd 4 nucléons, il émet donc forcément un noyau d'hélium 4, ${}_{2}^4\text{He}$, c'est une radioactivité α .

Le noyau d'iode se transforme en tellure, donc le nombre de charges a diminué d'une unité. Il y a donc émission d'un positon, c'est une radioactivité β^+ .

Le noyau de potassium se transforme en calcium, donc le nombre de charges a augmenté d'une unité. Il y a donc émission d'un électron, c'est une radioactivité β^- .

11 Utiliser le diagramme (N, Z) (1)

L'aluminium 27 est stable.

L'aluminium 26 est instable, il donne lieu à une radioactivité β^+ car il possède un excès de protons.

L'aluminium 28 est instable, il donne lieu à une radioactivité β^- car il possède un excès de neutrons.

12 Utiliser le diagramme (N, Z) (2)

1. Le plomb présente une radioactivité α . Le thallium et le mercure présentent une radioactivité β^+ .

2. Lors d'une désintégration radioactive, soit le nombre de masse est constant (radioactivités β^+ et β^-), soit il diminue de 4 (radioactivité α). La seule désintégration possible du plomb 184 est donc celle qui conduit au mercure 180 selon une radioactivité α , comme cela a été précisé à la question précédente. Le noyau fils est donc ${}_{80}^{180}\text{Hg}$.

13 Déterminer un nombre de noyaux radioactifs

1. $N_0 = 8 \times 10^6$ noyaux.

2. $N(t = 5 \text{ s}) = 4 \times 10^6$ noyaux.

$N(t = 10 \text{ s}) = 2 \times 10^6$ noyaux.

$N(t = 15 \text{ s}) = 1 \times 10^6$ noyaux.

3. La demi-vie est le temps au bout duquel la moitié des noyaux présents initialement se sont désintégrés. Donc :

– au bout de $t_{1/2} = 5$ jours, il reste :

$N(t = 5 \text{ s}) = \frac{N_0}{2} = 4 \times 10^6$ noyaux ;

– au bout de $2 \times t_{1/2} = 10$ jours, il reste :

$N(t = 10 \text{ s}) = \frac{N(t = 5 \text{ s})}{2} = 2 \times 10^6$ noyaux ;

– au bout de $3 \times t_{1/2} = 15$ jours, il reste :

$N(t = 15 \text{ s}) = \frac{N(t = 10 \text{ s})}{2} = 1 \times 10^6$ noyaux.

La demi-vie est donc bien égale à 5 s.

14 Calculer un nombre de noyaux radioactifs

1. $N(t) = N_0 \times e^{-\lambda \times t}$

2. $N(t = 5,0 \times 10^4 \text{ s}) = 1,0 \times 10^8 \times e^{-2,0 \times 10^{-6} \times 5,0 \times 10^4} = 9,0 \times 10^7$ noyaux.

$N(t = 5,0 \times 10^6 \text{ s}) = 1,0 \times 10^8 \times e^{-2,0 \times 10^{-6} \times 5,0 \times 10^6} = 4,5 \times 10^3$ noyaux.

3. Au bout de $5,0 \times 10^4 \text{ s}$, il reste plus de la moitié des noyaux initialement présents ($9,0 \times 10^7 > 5,0 \times 10^7$), donc cette date est inférieure à la demi-vie.

Au bout de $5,0 \times 10^6$ s, il reste moins de la moitié des noyaux initialement présents ($4,5 \times 10^3 < 5,0 \times 10^7$), donc cette date est supérieure à la demi-vie.

15 Calculer une durée

1. Loi de décroissance radioactive : $N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t}$.

$$e^{-\lambda t} = \frac{N(t)}{N_0}$$

$$-\lambda \times t = \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right), \text{ donc } t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right)$$

2. Si $N(t) = 0,01 \times N_0$, alors :

$$t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln(0,01) = -\frac{1}{1,8 \times 10^{-9}} \times \ln(0,01) = 2,6 \times 10^9 \text{ s} = 81 \text{ ans}$$

16 Déterminer une durée

1. $N_0 = 1\,000$ noyaux.

2. Lorsque 60 % se sont désintégrés, il en reste 40 %, soit $N = 400$ noyaux. Par lecture graphique, on trouve $t \approx 11$ jours. Il semble qu'il n'y ait plus de noyaux radioactifs dans l'échantillon au bout de 56 jours.

3. La demi-vie est de 8 jours (temps au bout duquel il reste $\frac{N_0}{2} = 500$ noyaux).

56 jours correspondent donc à 7 demi-vies ($\frac{56}{8} = 7$).

17 Déterminer une demi-vie

1. La demi-vie est le temps au bout duquel la moitié des noyaux initialement présents se sont désintégrés.

2. $N_0 = 1\,000\,000$ noyaux donc :

$$N(t_{1/2}) = 500\,000 \text{ noyaux.}$$

Par lecture graphique, on détermine $t_{1/2} = 30$ ans.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{30 \times 365,25 \times 24 \times 3\,600} = 7,3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

18 Utiliser une demi-vie

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \frac{\ln(2)}{1,4 \times 10^2} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ s} = 5,0 \text{ ms.}$$

La moitié des noyaux radioactifs disparaissent lorsqu'une demi-vie est écoulée.

| Durée (ms) | 0,0 | 5,0 | 10,0 | 20,0 |
|------------|-------------------------------|---|---|--|
| $N(t)$ | $2,00 \times 10^8$ $= N_0$ | $1,00 \times 10^8$ $= \frac{N_0}{2}$ | $5,00 \times 10^7$ $= \frac{N_0}{4}$ | $1,25 \times 10^7$ $= \frac{N_0}{16}$ |

19 Utiliser une activité

1. $A(t) = A_0 \times e^{-\lambda t}$.

$$2. e^{-\lambda t} = \frac{A(t)}{A_0} \quad -\lambda \times t = \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right), \text{ donc } t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

$$\text{Or } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

$$\text{Donc } t = -\frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A_0}{A(t)}\right)$$

$$3. t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A_0}{A(t)}\right) = \frac{5\,734}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{816,0}{600,0}\right) = 2\,544 \text{ ans}$$

$$2\,019 - 2\,544 = -525$$

Le pharaon est probablement mort en -525 av. J.-C.

20 Déterminer une activité

$$A(t) = A_0 \times e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

$$A(t) = A_0 \times e^{-\frac{\ln 2 \times t}{t_{1/2}}} = 816,0 \times e^{-\frac{\ln 2 \times 2000}{5734}} = 640,8 \text{ Bq}$$

21 Mesures de radioprotection pour une scintigraphie

1. Les seringues contenant le produit radioactif sont contenues dans des containers et des protège-seringues plombés (contenant du plomb). Lors de la préparation et de l'injection, le manipulateur doit porter des gants plombés. Lors de l'examen, l'utilisation d'écrans ou de tabliers plombés est préférable.

2. Le plomb est le métal qui permet d'atténuer le plus les rayons gamma. On voit dans les données qu'il suffit d'une épaisseur de 1,0 cm de plomb pour atténuer de moitié le flux de rayons gamma, alors qu'il faut jusqu'à 5 fois plus pour des métaux comme l'aluminium.

22 Manipulation de l'iode 131 en sécurité

1. Il est plus facile d'arrêter la particule β que le rayonnement γ car quel que soit le matériau utilisé, il en faut une épaisseur moindre par rapport à celle nécessaire pour arrêter le rayonnement gamma.

2. Les personnels médicaux pratiquant les imageries avec l'iode 131 doivent être protégés des rayonnements. Ils peuvent donc se placer derrière des écrans en verre plombé : ils peuvent toujours voir le patient et une épaisseur raisonnable suffit à arrêter suffisamment les rayonnements ionisants.

Exercices

S'entraîner

p. 125

23 À chacun son rythme

La découverte d'un élément radioactif

D'après le diagramme (N, Z) , le polonium $^{210}_{82}\text{Po}$ est radioactif α . Il va donc se désintégrer en émettant un noyau d'hélium ^4_2He . Lors de la désintégration, il y a conservation du nombre de charges, donc le noyau fils a un numéro atomique $Z = 84 - 2 = 82$; d'après le diagramme (N, Z) , il s'agit du plomb. Il y a également conservation du nombre de masse, donc le noyau fils a un nombre de masse : $A = 210 - 4 = 206$; donc $^{206}_{82}\text{Pb}$.

L'équation de la désintégration est : $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}$

24 Connaître les critères de réussite

La famille radioactive de l'uranium 238

1. $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$ (radioactivité α)

2. $^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{234}_{91}\text{Pa} + ^0_{-1}\text{e}$ (radioactivité β^-)

3. D'après l'équation globale, il se produit 6 désintégrations β^- et 8 désintégrations α pour passer de l'uranium 238 au plomb 206.

25 Des galères grecques à Marseille

1. $A(t) = A_0 \times e^{-\lambda t}$

$$2. e^{-\lambda t} = \frac{A(t)}{A_0}$$

$$-\lambda \times t = \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) \text{ donc } t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

3. La demi-vie correspond au temps au bout duquel $A(t) = \frac{A_0}{2}$.

$$\text{Donc } t_{1/2} = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ soit } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

$$4. t = -\frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A_0}{A(t)}\right)$$

$$5. t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A_0}{A(t)}\right) = \frac{5\,734}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{13,60}{9,94}\right) = 2\,593 \text{ ans}$$

$$2\,019 - 2\,593 = -574 \text{ ans}$$

Les navires auraient donc été construits vers -574 et il est donc possible qu'ils aient été coulés vers -545.

26 Radioactive decay of cesium-137

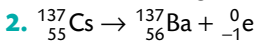
Traduction : La décomposition du césium-137

Les dispositifs radioactifs contenant du césium-137 sont une technologie éprouvée utilisée pour le traitement du cancer, pour la stérilisation de dispositifs médicaux et l'irradiation du sang pour traiter des patients. Le Césium-137 se décompose en baryum-137 par émission bêta. Le césium-137 et le baryum-137 ont pour numéros atomiques respectifs 55 et 56.

1. Quels sont les trois types de rayonnements ionisants émis par un noyau radioactif au cours d'une désintégration radioactive ?
2. Donner l'équation de la désintégration radioactive.

Réponses

1. Les trois types de rayonnements ionisants pouvant être émis lors d'une désintégration radioactive sont α , β (β^+ ou β^-) et γ .



27 L'iode 131 sur les forums

L'iode 131 est radioactif β^- et il émet également un rayonnement γ lors de sa désintégration. C'est ce rayonnement qui peut être détecté par un capteur, permettant de localiser l'iode 131 dans l'organisme, et donc de suivre en temps réel le fonctionnement de la thyroïde pour déceler d'éventuelles anomalies.

L'injection d'iode radioactif ne présente pas un grand danger, d'une part parce que la dose injectée est assez faible (activité $A_0 = 1,8$ kBq, ce qui correspond à 1,8 fois l'activité naturelle du corps humain), et d'autre part parce que la demi-vie de l'iode 131 est assez faible (8 jours, ce qui signifie qu'au bout d'une semaine, l'activité de l'iode injecté sera inférieure à l'activité du corps humain :

$$A(t_{1/2} = 8 \text{ jours}) = \frac{A_0}{2} = 0,9 \text{ kBq.}$$

De plus, l'élimination de l'iode radioactif est accélérée par la production d'urines et de selles.

28 Côté maths

Résoudre une équation différentielle du premier ordre

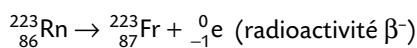
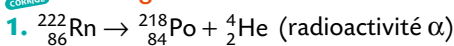
1. $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \times N(t)$.

2. La solution de cette équation différentielle est de la forme : $N(t) = A \times e^{-\lambda \times t}$.

Condition initiale : $N(0) = A = N_0 = 3,0 \times 10^7$ noyaux.

Donc $N(t) = 3,0 \times 10^7 \times e^{-9,1 \times 10^{-13} \times t}$.

29 Les dangers du radon



2. $A(t_{1/2}) = \frac{A_0}{2}$, on peut alors lire graphiquement que $A = \frac{A_0}{2}$ pour $t_{1/2} = 4$ jours.

3. Au bout de n demi-vies, $A = \frac{A_0}{2^n}$, donc :

| t (jours) | 0 | 4,0 (= $t_{1/2}$) | 8,0 (= $2t_{1/2}$) | 16,0 (= $4t_{1/2}$) |
|-----------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| A (Bq) | $8,0 \times 10^6$ | $4,0 \times 10^6$ | $2,0 \times 10^6$ | $5,0 \times 10^5$ |

4. Le radon 222 est formé naturellement à la suite de la désintégration de l'uranium 238. Si la vitesse de formation du radon est égale à la vitesse à laquelle il se désintègre, alors le nombre de noyaux de radon 222 présents dans l'atmosphère reste constant et il est normal que l'activité du radon reste constante au cours du temps.

5. $A = 60,0 \times n = 60,0 \times 10,5 = 630 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

Or la norme européenne prévoit de ne pas dépasser $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. Le propriétaire de cette cave doit donc rapidement prendre des mesures pour améliorer la qualité de l'air dans sa cave, comme installer une ventilation adaptée efficace (type VMC).

30 Protection contre les rayonnements ionisants

1. Pour manipuler des échantillons radioactifs alpha et bêta, il suffit de porter des gants. Pour une exposition longue, on peut se protéger à l'aide de feuilles d'aluminium, et il faut éviter d'inhaler les poussières radioactives, donc porter un masque et éventuellement une combinaison étanche.

2. En radioprotection, on utilise le plomb car c'est le métal qui arrête le mieux le flux des rayons gamma : on voit dans les données qu'il en faut une épaisseur 5 fois plus faible que le cuivre ou l'aluminium pour diviser par 8 ce flux.

3. L'indicateur de rayonnement γ , noté $\text{Ind}(\gamma)$ a pour expression :

$$\text{Ind}(\gamma) = K \times \frac{\text{Ind}(0)}{d^2}.$$

On calcule la constante K pour une distance $d = 90 \text{ m}$:

$$500 = K \times \frac{1000}{90^2} \Leftrightarrow K = 4050 \text{ m}^2.$$

On vérifie que les autres valeurs de l'indicateur, à 180 m et 254,5 m, vérifient la loi trouvée :

$$\text{Ind}_{180}(\gamma) = 4050 \times \frac{1000}{180^2} = 125;$$

$$\text{Ind}_{254,5}(\gamma) = 4050 \times \frac{1000}{254,5^2} = 62,5.$$

4. En radiologie, le fait de se placer derrière un écran en verre permet de s'éloigner de la source de rayonnement tout en gardant un contact visuel avec le patient, et le fait qu'il contienne du plomb permet une bonne absorption des rayons gamma.

5. Il faut porter une combinaison étanche contenant du plomb.

31 Résolution de problème

La gestion des déchets nucléaires

1^{re} étape : Bien comprendre la question posée

1. Comment classe-t-on la durée de vie d'un radioélément ?
2. Quelles sont les valeurs de l'activité permettant de choisir un type de stockage ?
3. Comment évolue l'activité au cours du temps en utilisant la demi-vie ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. Les trois radioéléments sont à vie courte (curium) ou longue (américium et plutonium).
2. Ils ont une haute activité lorsqu'ils sont produits dans la centrale. Il faut donc envisager un stockage en couche géologique profonde.
3. Pour modifier le type de stockage des déchets à longue vie, il faudrait que leur activité devienne inférieure à $10^6 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$.

3^e étape : Dégager la problématique

Déterminer la durée au bout de laquelle l'activité d'un radioélément lui permettrait de changer de mode de stockage.

4^e étape : Construire la réponse

- Déterminer le type d'activité de chaque radioélément ainsi que le type de durée de vie.
- En déduire le type de stockage initial de chaque radioélément.
- Exprimer la durée t en fonction de $A(t)$, A_0 et $t_{1/2}$.
- Déterminer t pour que le radioélément change de mode de stockage.
- Comparer avec la durée d'une vie humaine (environ 80 ans).

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

- Présenter le contexte et introduire la problématique. Pour connaître la date à laquelle un déchet nucléaire contenant un radioélément peut changer de mode de stockage, il est

nécessaire de déterminer la durée au bout de laquelle l'activité d'un gramme du radioélément, atteint les valeurs qui permettent un tel changement.

• Mettre en forme la réponse.

• Déterminer le type d'activité de chaque radioélément ainsi que le type de durée de vie.

Le radioélément curium est à vie courte et les radioéléments américium et plutonium sont à vie longue. Ils ont tous les trois une haute activité lorsqu'ils sont produits dans la centrale.

• En déduire le type de stockage initial de chaque radioélément. Il faut envisager un stockage en couche géologique profonde pour les trois.

• Exprimer la durée t en fonction de $A(t)$, A_0 et $t_{1/2}$.

$$A(t) = A_0 \times \exp(-\lambda \times t) \Leftrightarrow \exp(-\lambda \times t) = \frac{A(t)}{A_0}$$

$$\ln(\exp(-\lambda t)) = \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) \Leftrightarrow -\lambda \times t = \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

$$\Leftrightarrow t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

$$t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) \Leftrightarrow t = -\frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

• Déterminer t pour que le radioélément change de mode de stockage.

Le curium peut être stocké en surface dans un site dédié si son activité devient inférieure ou égale à $10^9 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$.

$$t = -\frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = -\frac{28,6}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{10^9}{610^9}\right) = 74 \text{ ans.}$$

Les radioéléments américium et plutonium peuvent être stockés en surface dans un site dédié si leur activité devient inférieure ou égale à $10^6 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$.

Pour l'américium :

$$t = -\frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = -\frac{152}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{10^6}{6 \times 10^9}\right) = 1908 \text{ ans.}$$

Pour le plutonium :

$$t = -\frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = -\frac{2,41 \times 10^4}{\ln(2)} \times \ln\left(\frac{10^6}{6 \times 10^9}\right)$$

$$t = 3,0 \times 10^5 \text{ ans.}$$

• Comparer avec la durée d'une vie humaine (environ 80 ans).

Pour l'américium et le plutonium, la durée est très supérieure à celle d'une vie humaine, alors que pour le curium elle en est du même ordre.

• Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

On peut envisager pour le curium, de modifier le type de stockage à l'échelle d'une vie humaine, ce qui ne l'est pas pour l'américium et le plutonium.

Vers le Bac

Préparation à l'écrit

32 CORRIGÉ La découverte de la radioactivité artificielle et ses applications

1. a. La particule α est un noyau d'hélium 4 de symbole ${}^4_2\text{He}$.

b. ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$

c. Le phosphore 30 est radioactif β^+ . Son équation de désintégration s'écrit : ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^0_1\text{e}$

d. $N(t = 13 \text{ min}) = 1000 \times \exp\left(-\ln(2) \times \frac{13 \times 60}{3 \times 60 + 15}\right)$
 $= 63 \text{ noyaux}$

2. a. La demi-vie est le temps au bout duquel la moitié des noyaux présents initialement se sont désintégrés, ou que l'activité initiale a été divisée par deux.

Par lecture graphique : $t_{1/2} = 6 \text{ h}$.

b. $A(t = 120 \text{ h}) = 400 \times \exp\left(-\ln(2) \times \frac{120}{6}\right)$
 $= 4 \times 10^{-4} \text{ MBq} = 4 \times 10^2 \text{ Bq}$.

c. $A(t = 3,5 \text{ h}) = 400 \times \exp\left(-\ln(2) \times \frac{3,5}{6}\right) = 267 \text{ MBq}$.

La durée écoulée au bout de $20 \times t_{1/2}$ est égale à 120 heures soit 5 jours $\left(\frac{120}{24} = 5\right)$.

La date associée, à partir du lundi 15 heures, est le samedi 15 heures.

33 CORRIGÉ La datation à l'uranium 238

1. Par détermination graphique : $t_{1/2} = 4,5 \times 10^9 \text{ an}$.

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{\ln(2)}{4,5 \times 10^9} = 1,5 \times 10^{-10} \text{ an}^{-1}$$

2. Le nombre initial de noyaux d'uranium 238 : $N_0 = 5,0 \times 10^{12}$. L'équation différentielle vérifiée par $N(t)$ peut s'écrire :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$$

La fonction dérivée $\frac{dN(t)}{dt}$ est proportionnelle à la fonction N .

La solution est donc de la forme : $N(t) = A \times e^{-\lambda \times t}$.

On exprime la condition initiale :

$$N(0) = N_0 \Leftrightarrow A = N_0 = 5,0 \times 10^{12}$$

La solution s'écrit : $N(t) = N_0 \times e^{-\lambda \times t}$

$$\text{soit } N(t) = 5,0 \times 10^{12} \times e^{-1,5 \times 10^{-10} \times t}$$

3. $N_0 = N(t) + N_{\text{pb}}$.

$$4. N(t) = N_0 - N_{\text{pb}} = 4,5 \times 10^{12}$$

soit t égal à $0,5 \times 10^9 \text{ an} = 5 \times 10^8 \text{ an}$ (500 millions d'années).

Cela est bien compatible avec la fin de la première ère interglaciaire.

Préparation à l'ECE

1. Il faut sélectionner le technétium en écrivant son symbole Tc dans la barre de sélection.
2. Le noyau fils pour une radioactivité β^+ est situé en diagonale sur la ligne en dessous, à droite et pour une radioactivité β^- est situé en diagonale sur la ligne au-dessus, à gauche.

Les isotopes recherchés sont : ^{94}Tc ; ^{95}Tc ; ^{96}Tc ; ^{97}Tc ; ^{98}Tc ; ^{99}Tc ; ^{100}Tc ; ^{101}Tc ; ^{102}Tc .

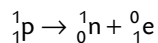
3. Le technétium ne possède aucun isotope stable, c'est la raison pour laquelle il a été identifié en dernier.

Vers l'oral

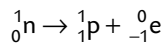
À deux, c'est mieux

Évaluation orale n° 1

Un noyau présentant un excès de **proton** sera sensible à la radioactivité **béta plus**, au cours de laquelle un **positon** est émis : le proton se transforme en un neutron et un positon qui est éjecté du noyau.



Un noyau présentant un excès de **neutron** sera sensible à la radioactivité **béta moins**, au cours de laquelle un **électron** est émis : le neutron se transforme en un proton et un électron qui est éjecté du noyau.



Évaluation orale n° 2

L'**assimilation du carbone 14** se fait tout au long de la vie de la matière vivante par la respiration, l'alimentation. Après la mort, cette assimilation s'arrête et du fait de la **décroissance radioactive**, la quantité de carbone 14 ainsi que son **activité** diminue au cours du temps. La **demi-vie** du carbone 14 est égale à 5 734 ans, ce qui signifie qu'au bout de cette durée, la moitié des noyaux initialement présents ont disparu. Les derniers dinosaures se sont éteints il y a 65 millions d'années :

$$\frac{65 \times 10^6}{5734} \approx 10^5.$$

La **demi-vie** du carbone 14 est beaucoup trop petite pour espérer encore avoir du carbone 14 dans les os des dinosaures : on ne peut pas les dater avec cette méthode.

Je m'exprime à l'oral sur

La transformation nucléaire

- **Nommer les trois types de radioactivité.**

On distingue la radioactivité β^+ (émission d'un positon), la radioactivité β^- (émission d'un électron) et la radioactivité α (émission d'un noyau d'hélium 4).

- **Définir la demi-vie d'un noyau radioactif.**

C'est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents ont disparu par désintégration radioactive.

- **Quelle est l'expression du nombre de noyaux radioactifs encore présents dans un échantillon à un instant t ?**

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda \times t}.$$

- **Citer des applications de la radioactivité.**

La radioactivité peut être utilisée pour dater un objet ancien contenant du carbone (datation au carbone 14 radioactif) mais aussi dans le domaine médical pour explorer le corps (scintigraphie) ou pour soigner des cancers (radiothérapie).

7

Sens d'évolution spontanée d'un système chimique

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique | |
|--|--|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| A) Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique | |
| État final d'un système siège d'une transformation non totale : état d'équilibre chimique. | Relier le caractère non total d'une transformation à la présence, à l'état final du système, de tous les réactifs et de tous les produits. |
| Modèle de l'équilibre dynamique. | <i>Mettre en évidence la présence de tous les réactifs dans l'état final d'un système siège d'une transformation non totale, par un nouvel ajout de réactifs.</i> |
| Quotient de réaction Q_r . Système à l'équilibre chimique : constante d'équilibre $K(T)$. Critère d'évolution spontanée d'un système hors équilibre chimique. | Déterminer le sens d'évolution spontanée d'un système. Déterminer un taux d'avancement final à partir de données sur la composition de l'état final et le relier au caractère total ou non total de la transformation. <i>Déterminer la valeur du quotient de réaction à l'état final d'un système, siège d'une transformation non totale, et montrer son indépendance vis-à-vis de la composition initiale du système à une température donnée.</i> |
| Transformation spontanée modélisée par une réaction d'oxydo-réduction. | <i>Illustrer un transfert spontané d'électrons par contact entre réactifs et par l'intermédiaire d'un circuit extérieur.</i> |
| Pile, demi-piles, pont salin ou membrane, tension à vide. | Justifier la stratégie de séparation des réactifs dans deux demi-piles et l'utilisation d'un pont salin. |
| Fonctionnement d'une pile ; réactions électrochimiques aux électrodes. | Modéliser et schématiser, à partir de résultats expérimentaux, le fonctionnement d'une pile. |
| Usure d'une pile, capacité électrique d'une pile. | Déterminer la capacité électrique d'une pile à partir de sa constitution initiale. <i>Réaliser une pile, déterminer sa tension à vide et la polarité des électrodes, identifier la transformation mise en jeu, illustrer le rôle du pont salin.</i> |
| Oxydants et réducteurs usuels. | Citer des oxydants et des réducteurs usuels : eau de Javel, dioxygène, dichlore, acide ascorbique, dihydrogène, métaux. Justifier le caractère réducteur des métaux du bloc s. |

Liens avec les programmes officiels de seconde, de première et de terminale

| Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|---|--|---------------------|
| SECONDE | | |
| Quantité de matière | | |
| PREMIÈRE | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Avancement final, avancement maximal. Transformations totale et non totale. Évolution des quantités de matière lors d'une transformation. | <ul style="list-style-type: none"> À partir de données expérimentales, identifier le transfert d'électrons entre deux réactifs et le modéliser par des demi-équations électroniques et par une réaction d'oxydoréduction. <i>Mettre en œuvre des transformations modélisées par des réactions d'oxydoréduction.</i> Déterminer la composition du système dans l'état final en fonction de sa composition initiale pour une transformation considérée comme totale. <i>Déterminer la composition de l'état final d'un système et l'avancement final d'une réaction.</i> | |

TERMINALE

| | | |
|--|--|--|
| État final d'un système siège d'une transformation non totale : état d'équilibre chimique. | <ul style="list-style-type: none"> • Illustrer un transfert spontané d'électrons par contact entre réactifs et par l'intermédiaire d'un circuit extérieur. • Relier le caractère non total d'une transformation à la présence, à l'état final du système, de tous les réactifs et de tous les produits. • Déterminer un taux d'avancement final à partir de données sur la composition de l'état final et le relier au caractère total ou non total de la transformation. | |
|--|--|--|

Vu en première

Réactions d'oxydoréduction

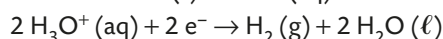
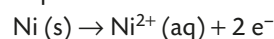
p. 132

Réactiver ses connaissances

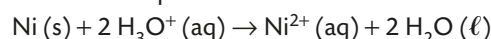
Capsule vidéo de cours : Équation d'oxydoréduction

- Les réactifs envisagés lors de cette transformation sont le nickel Ni (s) et les ions hydronium H₃O⁺ (aq).
- Comme le gaz formé lors de l'approche d'une allumette enflammée produit une détonation, un des produits est le dihydrogène H₂ (g). Les ions H₃O⁺ (aq) se sont donc réduits en dihydrogène H₂ (g).
- La solution obtenue est de couleur verte. Des ions nickel (II) Ni²⁺ (aq) sont donc présents. Le nickel Ni (s) s'est donc oxydé en ions nickel (II) Ni²⁺ (aq).

- On peut écrire les équations des réactions électrochimiques :



- L'équation de la réaction est obtenue en sommant les deux réactions électrochimiques :



Flash test

- 1. A et C ; 2. A ; 3. A et C.**

Activité 1

expérimentale

 Notion d'équilibre dynamique

p. 133

Capacités exigibles

- Relier le caractère non total d'une transformation à la présence, à l'état final du système, de tous les réactifs et de tous les produits.
- Mettre en évidence la présence de tous les réactifs dans l'état final d'un système siège d'une transformation non totale, par un nouvel ajout de réactifs.

Matériel :

- Bécher de 100 mL.
- Bécher de 50 mL.
- Trois éprouvettes de 25 mL.
- Trois pipettes jaugées de 25 mL.
- Bain-marie.
- Chronomètre.
- Spectrophotomètre monolongueur d'onde ($\lambda = 480 \text{ nm}$) et une cuve.

Consommables :

- Solution S₁ de nitrate d'argent telle que : [Ag⁺] = 1,0 × 10⁻¹ mol · L⁻¹, V = 30 mL.
- Solution S₂ de nitrate de fer (II) telle que : [Fe²⁺] = 1,0 × 10⁻¹ mol · L⁻¹ et préparée dans l'acide nitrique 0,1 mol · L⁻¹, V = 30 mL.
- Solution S₃ de nitrate de fer (III) telle que : [Fe³⁺] = 5,0 × 10⁻¹ mol · L⁻¹ et préparée dans l'acide nitrique 0,1 mol · L⁻¹, V = 30 mL.
- Fil d'argent.

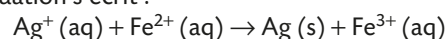
Erratum : erreur dans le spécimen corrigée dans le manuel de l'élève :

Le coefficient d'absorption molaire des ions fer (III), Fe³⁺ (aq), à $\lambda = 480 \text{ nm}$, est égal à 7,27 L · mol⁻¹ · cm⁻¹ et non 1,27 L · mol⁻¹ · cm⁻¹.

Pratique expérimentale

- 1** La solution se colore en jaune (formation des ions fer (III) Fe³⁺ (aq)) et un dépôt d'argent Ag (s) se forme.

- 2 a.** L'équation s'écrit :



- b.** Supposons la transformation totale ($x_f = x_{\text{max}}$) :

| Équation de la réaction | | Ag ⁺ (aq) + Fe ²⁺ (aq) → Ag (s) + Fe ³⁺ (aq) | | | |
|-------------------------|--------------------|---|--|-------|----------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | | | |
| | | n(Ag ⁺) | n(Fe ²⁺) | n(Ag) | n(Fe ³⁺) |
| État initial | x = 0 | [Ag ⁺] × V _{Ag} = 2,5 | [Fe ²⁺] × V _{Fe} = 2,5 | 0 | 0 |
| État final | x = x _f | 2,5 - x _f = 0 | 2,5 - x _f = 0 | 2,5 | 2,5 |

Soit $[\text{Fe}^{3+}]_f = \frac{n(\text{Fe}^{3+})}{V_{\text{tot}}} = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et

$[\text{Ag}^{+}]_f = [\text{Fe}^{2+}]_f \approx 0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

- 3** On mesure l'absorbance : A = 0,05.

Or $A = \varepsilon(\text{Fe}^{3+}) \times \ell \times [\text{Fe}^{3+}]_f$ donc $[\text{Fe}^{3+}]_f = \frac{A}{\varepsilon(\text{Fe}^{3+}) \times \ell}$.

Application numérique :

$[\text{Fe}^{3+}]_f = \frac{0,05}{7,27} = 6,9 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

$[\text{Fe}^{3+}]_f < [\text{Fe}^{3+}]_{\text{max}} \Rightarrow$ la transformation n'est donc pas totale.

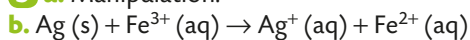
- 4 a. et b.** Protocole :

• On ajoute 1 mL de solution S₁ contenant les ions argent (I) Ag⁺ (aq). L'absorbance augmente. Il y a donc eu formation d'ions fer (III) Fe³⁺ (aq). Les ions argent (I) Ag⁺ (aq) ajoutés ont réagi avec des ions fer (II) Fe²⁺ (aq). Les ions fer (II) Fe²⁺ (aq) étaient donc présents dans le filtrat.

• On ajoute 1 mL de solution S_2 contenant les ions fer (II) Fe^{2+} (aq). L'absorbance augmente. Il y a donc eu formation d'ions fer (III) Fe^{3+} (aq). Les ions fer (II) Fe^{2+} (aq) ajoutés ont réagi avec des ions argent (I) Ag^+ (aq). Les ions argent (I) Ag^+ (aq) étaient donc présents dans le filtrat.

c. À l'état d'équilibre chimique, les réactifs et produits sont présents dans le système.

5 a. Manipulation.



c. Le réactif en excès est l'argent. La solution est toujours colorée en jaune, ce qui montre que la transformation n'est pas totale. Toutefois, son intensité a diminué, ce qui montre que l'avancement n'est pas nul.

d. Si un système atteint un état d'équilibre chimique, c'est que la transformation peut être modélisée par deux réactions opposées.

Un pas vers le cours

6 À l'échelle macroscopique, lorsque le système n'évolue plus, il est à l'état d'équilibre. La vitesse d'apparition de toute espèce chimique intervenant dans l'équation de la réaction est alors égale à sa vitesse de disparition.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

- Les mesures ont été réalisées avec un spectrophotomètre PRIM C Secomam. Le choix de la longueur d'onde ($\lambda = 480$ nm) peut être à modifier suivant l'appareil. Une faible diminution de la longueur d'onde permet d'augmenter la valeur de l'absorbance. Le coefficient d'absorption molaire doit être recalculé à la longueur d'onde choisie.
- Des fils en métal argenté sont disponibles dans les commerces de loisirs créatifs et peuvent suffire pour réaliser l'activité. On trouve également des fils en argent (≈ 10 euros).

Activité 2

expérimentale Constante d'équilibre

p. 134

Capacité exigible

- Déterminer la valeur du quotient de réaction à l'état final d'un système, siège d'une transformation non totale, et montrer son indépendance vis-à-vis de la composition initiale du système à une température donnée.

Matériel :

- Quatre fioles jaugées de 50,0 mL.
- Deux pipettes jaugées de 5,0 mL.
- Deux pipettes jaugées de 10,0 mL.
- Propipette.
- Spectrophotomètre monolongueur d'onde ($\lambda = 580$ nm) et une cuve.

Consommables :

- Solution de nitrate de fer (III) telle que : $[Fe^{3+}] = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$ et préparée dans l'acide nitrique à $0,1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$, $V = 40 \text{ mL}$.
- Solution de thiocyanate de potassium telle que : $[SCN^-] = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$ et préparée dans l'acide nitrique à $0,1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$, $V = 40 \text{ mL}$.
- Solution d'acide nitrique de concentration $C = 0,1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ en ion oxonium H_3O^+ (aq), $V = 120 \text{ mL}$.
- Nitrate de fer (III), $Fe(NO_3)_3$, $m = 20 \text{ mg}$.

Erratum : erreur dans le spécimen corrigée dans le manuel de l'élève :

Le coefficient d'absorption molaire de l'espèce $Fe(SCN)^{2+}$ à $\lambda = 580$ nm est égal à $5,1 \times 10^2 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ et non $5,1 \times 10^{-1} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

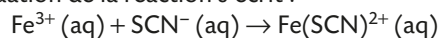
Pratique expérimentale

1

| Solution | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| V_{Fe} (mL) | 5,0 | 5,0 | 10,0 | 10,0 |
| V_{SCN} (mL) | 5,0 | 10,0 | 5,0 | 10,0 |
| A | 0,181 | 0,323 | 0,277 | 0,518 |

2 Si on se place au maximum d'absorption ($\lambda = 470$ nm) de l'espèce $Fe(SCN)^{2+}$ (aq), on peut constater que les ions fer (III) Fe^{3+} (aq) absorbent également. À $\lambda = 580$ nm, seule l'espèce $Fe(SCN)^{2+}$ (aq) absorbe, l'absorbance est alors proportionnelle à la concentration de l'espèce $Fe(SCN)^{2+}$ (aq).

3 a. L'équation de la réaction s'écrit :



b. Pour chaque solution, on peut déterminer l'avancement final x_f :

$$x_f = [Fe(SCN)^{2+}] \times V_{50}$$

$$x_f = \frac{A}{\epsilon(Fe(SCN)^{2+}) \times \ell} \times V_{50}$$

$$x_f = \frac{A}{5,1 \times 10^2 \times 1} \times 50 \times 10^{-3} = 9,8 \times 10^{-5} \times A.$$

| Solution | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| V_{Fe} (mL) | 5,0 | 5,0 | 10,0 | 10,0 |
| $n_0(Fe^{3+})$ | $1,00 \times 10^{-4}$ | $1,00 \times 10^{-4}$ | $2,00 \times 10^{-4}$ | $2,00 \times 10^{-4}$ |
| V_{SCN} (mL) | 5,0 | 10,0 | 5,0 | 10,0 |
| $n_0(SCN^-)$ | $5,00 \times 10^{-5}$ | $1,00 \times 10^{-4}$ | $5,00 \times 10^{-5}$ | $1,00 \times 10^{-4}$ |
| x_{max} (mol) | $5,00 \times 10^{-5}$ | $1,00 \times 10^{-4}$ | $5,00 \times 10^{-5}$ | $1,00 \times 10^{-4}$ |
| A | 0,181 | 0,323 | 0,277 | 0,518 |
| x_f (mol) | $1,8 \times 10^{-5}$ | $3,2 \times 10^{-5}$ | $2,7 \times 10^{-5}$ | $5,1 \times 10^{-5}$ |

c. Les compositions des différentes solutions sont les suivantes :

| Solution | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 |
|---------------------------|---|---|---|---|
| $n_0(Fe^{3+})$ (mol) | $n_0(Fe^{3+}) - x_f = 8,2 \times 10^{-5}$ | $n_0(Fe^{3+}) - x_f = 6,8 \times 10^{-5}$ | $n_0(Fe^{3+}) - x_f = 1,7 \times 10^{-4}$ | $n_0(Fe^{3+}) - x_f = 1,5 \times 10^{-4}$ |
| $n_f(SCN^-)$ (mol) | $n_0(SCN^-) - x_f = 3,2 \times 10^{-5}$ | $n_0(SCN^-) - x_f = 6,8 \times 10^{-5}$ | $n_0(SCN^-) - x_f = 2,3 \times 10^{-5}$ | $n_0(SCN^-) - x_f = 4,9 \times 10^{-5}$ |
| $n_f(Fe(SCN)^{2+})$ (mol) | $x_f = 1,8 \times 10^{-5}$ | $x_f = 3,2 \times 10^{-5}$ | $x_f = 2,7 \times 10^{-5}$ | $x_f = 5,1 \times 10^{-5}$ |

d. Pour chaque solution $x_f < x_{max}$, la transformation n'est pas totale, elle est modélisée par deux réactions opposées. Réactifs et produits coexistent et leurs concentrations n'évoluent plus. Le système a donc atteint un état d'équilibre.

4

| Solution | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $[\text{Fe}^{3+}] = \frac{n_f(\text{Fe}^{3+})}{V_{50}}$ (mol · L ⁻¹) | 1,6 × 10 ⁻³ | 1,4 × 10 ⁻³ | 3,4 × 10 ⁻³ | 3,0 × 10 ⁻³ |
| $[\text{SCN}^-] = \frac{n_f(\text{SCN}^-)}{V_{50}}$ (mol · L ⁻¹) | 6,4 × 10 ⁻⁴ | 1,4 × 10 ⁻³ | 4,6 × 10 ⁻⁴ | 9,8 × 10 ⁻⁴ |
| $[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}] = \frac{n_f(\text{Fe}(\text{SCN})^{2+})}{V_{50}}$ (mol · L ⁻¹) | 3,6 × 10 ⁻⁴ | 6,4 × 10 ⁻⁴ | 5,4 × 10 ⁻⁴ | 1,0 × 10 ⁻³ |
| $Q_{r,\text{éq}} = \frac{[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}] \times c^0}{[\text{Fe}^{3+}] \times [\text{SCN}^-]}$ | 3,5 × 10 ² | 3,3 × 10 ² | 3,5 × 10 ² | 3,4 × 10 ² |

On constate que lorsque le système est à l'état d'équilibre, le quotient de réaction à l'état final d'un système, est indépendant vis-à-vis de la composition initiale du système à une température donnée : $Q_{r,\text{éq}} \approx \text{constante}$.

5 a. Protocole expérimental 2 : $A = 0,407$ (l'absorbance a augmenté).

b. Puisque l'absorbance a augmenté, l'espèce $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$ (aq) est en quantité plus importante dans la solution. La transformation a évolué dans le sens direct de l'équation.

c. • 10 mL de solution S₃ contient :

| $n(\text{Fe}^{3+})$ (mol) | $n(\text{SCN}^-)$ (mol) | $n(\text{Fe}(\text{SCN})^{2+})$ (mol) |
|---|---|---|
| $[\text{Fe}^{3+}] \times V_{10}$ $= 3,4 \times 10^{-3} \times 0,010$ $= 3,4 \times 10^{-5}$ | $[\text{SCN}^-] \times V_{10}$ $= 4,6 \times 10^{-4} \times 0,010$ $= 4,6 \times 10^{-6}$ | $[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}] \times V_{10}$ $= 5,4 \times 10^{-4} \times 0,010$ $= 5,4 \times 10^{-6}$ |

• On calcule la quantité n d'ions fer (II) ajouté :

$$n = \frac{m}{M} = 8,3 \times 10^{-5} \text{ mol.}$$

• Après l'ajout du nitrate de fer (III), les quantités de matière est les concentrations sont les suivantes.

| | $n(\text{Fe}^{3+})$ (mol) | $n(\text{SCN}^-)$ (mol) | $n(\text{Fe}(\text{SCN})^{2+})$ (mol) |
|---|--|----------------------------|--|
| Quantité de matière n (mol) | $3,4 \times 10^{-5} + 8,3 \times 10^{-5}$ $= 1,17 \times 10^{-4}$ | $4,6 \times 10^{-6}$ | $5,4 \times 10^{-6}$ |
| Concentration $\frac{n}{V_{10}}$ (mol · L ⁻¹) | $1,17 \times 10^{-2}$ | $4,6 \times 10^{-4}$ | $5,4 \times 10^{-4}$ |

$$Q_{r,i} = \frac{[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}]_i \times c^0}{[\text{Fe}^{3+}]_i \times [\text{SCN}^-]_i} = 100 \text{ soit } Q_{r,i} < Q_{r,\text{éq}}$$

Si $Q_{r,i} < Q_{r,\text{éq}}$, la transformation évolue dans le sens direct de l'équation.

Si $Q_{r,i} > Q_{r,\text{éq}}$, la transformation évolue dans le sens indirect de l'équation.

Si $Q_{r,i} = Q_{r,\text{éq}}$, le système est à l'état d'équilibre.

Un pas vers le cours

6 À une température donnée, lorsque la transformation a atteint un état d'équilibre, le quotient de réaction $Q_{r,\text{éq}}$ est indépendant de la composition initiale et correspond à une constante appelée constante d'équilibre notée K .

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

• Cette activité se prête bien au travail collaboratif. La classe peut être répartie en groupes de 4, chaque élève prépare et fait les mesures sur une solution.

• Une quantité plus importante de nitrate de fer (III) peut être ajoutée. Même si la pesée de la masse de nitrate de fer à ajouter est peu précise, la conclusion reste inchangée.

Si on dispose de balance, à 10⁻⁴ g, on peut montrer aux élèves que le quotient de réaction à l'état final, après ajout de nitrate de fer (III) solide, est égal à la constante d'équilibre K .

• Pour des questions de matériel, l'échantillon de nitrate de fer (III) à ajouter peut être flaconné à l'avance.

Activité 3

expérimentale Réaliser une pile

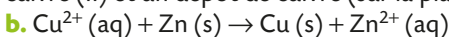
p. 135

Capacités exigibles

- Illustrer un transfert spontané d'électrons par contact entre réactifs et par l'intermédiaire d'un circuit extérieur.
- Justifier l'utilisation d'un pont salin.
- Modéliser et schématiser, à partir de résultats expérimentaux, le fonctionnement d'une pile.
- Déterminer la capacité électrique d'une pile à partir de sa constitution initiale.
- Réaliser une pile, déterminer sa tension à vide et la polarité des électrodes, identifier la transformation mise en jeu, illustrer le rôle du pont salin.

Pratique expérimentale

1 a. On observe une décoloration de la solution de sulfate de cuivre (II) et un dépôt de cuivre (sur la plaque de zinc).

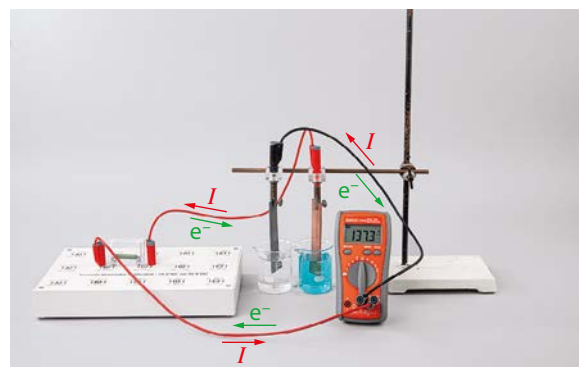


2 Le transfert d'électrons se fait sans fournir d'énergie extérieure, il est spontané et se réalise par contact direct entre les réactifs Cu^{2+} (aq) et Zn (s).

$$\text{3 } Q_{r,i} = \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} = \frac{1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}}{1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}} = 1 \ll K = 10^{37}$$

⇒ la transformation évolue donc dans le sens direct.

4 a. L'électrode de cuivre est branchée sur la borne mA de l'ampèremètre et l'électrode de zinc sur la borne COM de l'ampèremètre. L'intensité lue est positive donc le courant circule de l'électrode de cuivre vers l'électrode de zinc.



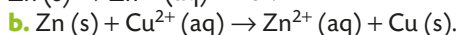
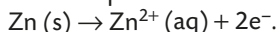
b. Si on retire le pont salin, aucun courant ne circule.

c. Le pont salin permet de fermer le circuit pour assurer la circulation du courant.

5 a. Le sens de circulation des électrons est opposé au sens conventionnel du courant. Aussi, à l'extérieur du circuit, les électrons circulent de la borne - vers la borne +.

• À la borne + : les électrons arrivent sur l'électrode de cuivre Cu (s) et sont consommés, une réduction se produit. L'équation de la réaction électrochimique sur l'électrode de cuivre (borne +) s'écrit : $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$.

• À la borne - : les électrons sont cédés par l'électrode de zinc Zn (s), une oxydation se produit. L'équation de la réaction électrochimique sur l'électrode de zinc (borne -) s'écrit :



c. Le transfert d'électrons se fait sans fournir d'énergie extérieure, il est spontané. Les réactifs ne sont pas en contact et le transfert d'électrons se fait par l'intermédiaire d'un circuit électrique extérieur.

6 a. Pour mesurer la tension aux bornes de la pile, il faut retirer la résistance et relier l'électrode de cuivre Cu (s) directement à la borne mA de l'ampèremètre.

b. Mesure de la tension à vide.

c. La tension lue est positive. Ainsi, l'électrode de cuivre est la borne + et l'électrode de zinc est la borne -. Le courant circule donc bien de la borne + (cuivre) à la borne - (zinc).

7 Pour déterminer la capacité de la pile, il faut déterminer les quantités des réactifs.

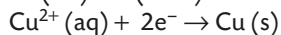
• Zinc Zn (s) : on pèse l'électrode $m(\text{Zn}) = 19,5 \text{ g}$

$$\text{soit } n(\text{Zn}) = \frac{m(\text{Zn})}{M} = 0,298 \text{ mol};$$

• Ion cuivre (II) $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$:

$$n(\text{Cu}^{2+}) = [\text{Cu}^{2+}] \times V = 1,0 \times 10^{-1} \times 10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}.$$

• $n(\text{Zn}) > n(\text{Cu}^{2+})$ donc Cu^{2+} est le réactif limitant.



$$\text{donc } \frac{n(\text{e}^-)_{\text{max}}}{2} = n(\text{Cu})$$

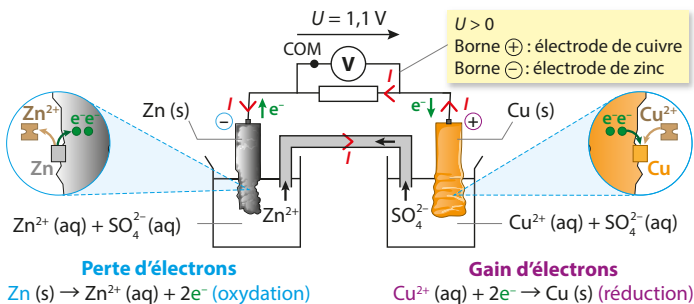
$$\text{soit } n(\text{e}^-)_{\text{max}} = 2 \times n(\text{Cu}) = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol}.$$

$$Q_{\text{max}} = n(\text{e}^-)_{\text{max}} \times N_A \times e$$

$$Q_{\text{max}} = 2,0 \times 10^{-3} \times 6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19} = 192 \text{ C}.$$

Un pas vers le cours

8



Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité permet d'introduire le vocabulaire et les notions des piles.

Capsules vidéos de cours :
 • Équation d'oxydoréduction
 • Tableau d'avancement
 • Pile électrochimique

QCM

p. 141

1. A et B; 2. A et C; 3. A et C; 4. B et C; 5. B; 6. B; 7. B et C; 8. A; 9. B et C; 10. B; 11. B.

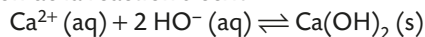
Exercices

Appliquer le cours

p. 144

3 Identifier la présence de réactifs

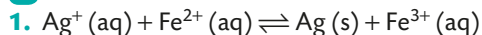
1. L'équation de la réaction s'écrit :



2. Un précipité blanc d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$ se forme dans les deux tubes. Il reste donc des ions $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$ et $\text{HO}^-(\text{aq})$ dans le filtrat.

3. Puisqu'il reste des ions hydroxyde $\text{HO}^-(\text{aq})$ et des ions calcium $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$ dans la solution filtrée, la transformation n'est pas totale.

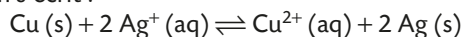
4 Caractériser une transformation



2. Après chaque ajout de sulfate de fer (II), de l'argent Ag (s) et ions fer (III) se forment. Les quantités de matière des réactifs $\text{Ag}^+(\text{aq})$ et $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ varient mais aucune ne s'annule. On en déduit donc que la transformation n'est donc pas totale.

5 Déterminer un taux d'avancement final

1. La solution se colore en bleue, des ions cuivre (II) $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$ se sont formés. Par ailleurs, de l'argent Ag (s) se dépose sur le cuivre. L'équation s'écrit :



2. • L'absorbance A de la solution obtenue est égale à 0,47. En reportant sur la courbe d'étalonnage, on détermine la concentration des ions cuivre (II) $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$ soit $[\text{Cu}^{2+}] = 3,7 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

• La quantité $n(\text{Cu})$ de cuivre formé est égale :

$$n(\text{Cu}) = [\text{Cu}^{2+}] \times V = 3,7 \times 10^{-3} \text{ mol}.$$

L'avancement final vaut : $x_f = 3,7 \times 10^{-3} \text{ mol}$

• Les quantités initiales respectives $n(\text{Ag}^+)$ et $n(\text{Cu})$ d'ions argent et de cuivre sont :

$$n(\text{Ag}^+) = [\text{Ag}^+] \times V = 7,5 \times 10^{-3} \text{ mol et}$$

$$n(\text{Cu}) = \frac{m(\text{Cu})}{M(\text{Cu})} = 7,8 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

On a $\frac{n(\text{Cu})}{1} > \frac{n(\text{Ag}^+)}{2}$ donc les ions Ag^+ correspondent au réactif

limitant. La quantité d'ions cuivre (II) maximale est donc égale à $\frac{n(\text{Ag}^+)}{2}$ soit un avancement maximal $x_{\text{max}} = 3,7 \times 10^{-3} \text{ mol}$. Le taux

d'avancement τ s'exprime par $\tau = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = 1$. La transformation est donc totale.

6 Calculer un taux d'avancement final

1. • Masse d'acide éthanóique apporté :

$$m = d \times V_A \times \rho_{\text{eau}} = 1,00 \text{ mL} \times 1,05 \times 1 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1} = 1,05 \text{ g}.$$

• Quantité d'acide éthanóïque apportée :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1,05 \text{ g}}{60,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 17,5 \text{ mmol.}$$

L'eau est en large excès, donc l'avancement maximal correspond à la quantité d'acide éthanóïque apporté, soit $x_{\text{max}} = 17,5 \text{ mmol}$.

2. Le pH est égal à 3,1 donc :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{CH}_3\text{CO}_2^-] = 10^{-\text{pH}} = 7,9 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Or $[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{x_f}{V}$ donc $x_f = [\text{H}_3\text{O}^+] \times V = 0,40 \text{ mmol}$.

3. Le taux d'avancement final τ est égal à $\frac{x_f}{x_{\text{max}}} = 2,3 \%$. La transformation n'est donc pas totale.

7 Exprimer un quotient de réaction

$$1. Q_{r,1} = \frac{[\text{Pb}^{2+}] \times [\text{HO}^-]^2}{(c^\circ)^3} \text{ et } Q_{r,2} = \frac{[\text{Pb}^{2+}]^2 \times [\text{HO}^-]^4}{(c^\circ)^6}$$

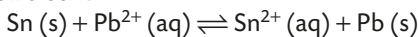
2. (2) = (1) \times 2 et $Q_{r,2} = Q_{r,1}^2$. L'expression du quotient de réaction dépend donc de l'écriture de l'équation de la réaction.

8 Lier équation et quotient de réaction

$$1. \frac{[\text{Ag}^+]^2}{[\text{Cu}^{2+}] \times c^\circ} \quad 2. \frac{[\text{Cu}^{2+}] \times [\text{HO}^-]^2}{(c^\circ)^3}$$

9 Prévoir le sens d'évolution spontanée

1. L'équation s'écrit :



$$2. Q_{r,i} = \frac{[\text{Sn}^{2+}]_i}{[\text{Pb}^{2+}]_i} = \frac{0}{1,0 \times 10^{-2}} = 0.$$

3. $Q_{r,i} < K$ donc le système évolue dans le sens direct de l'équation soit la formation d'ions étain (II) $\text{Sn}^{2+} (\text{aq})$ et plomb solide Pb (s) .

4. À l'état final, la concentration en ions étain (II) est telle que $[\text{Sn}^{2+}] = 2,5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Il s'est donc formé une quantité $n(\text{Sn}^{2+})$ d'ions étain (II) égale à :

$$n(\text{Sn}^{2+}) = [\text{Sn}^{2+}] \times V = 5,0 \times 10^{-5} \text{ mol.}$$

La quantité $n_{\text{réagi}}(\text{Pb}^{2+})$ d'ions plomb (II) qui a réagi est :

$$n_{\text{réagi}}(\text{Pb}^{2+}) = 5,0 \times 10^{-5} \text{ mol.}$$

La quantité $n_f(\text{Pb}^{2+})$ finale d'ions plomb (II) correspond à :

$$n_f(\text{Pb}^{2+}) = [\text{Pb}^{2+}]_i \times V - n_{\text{réagi}}(\text{Pb}^{2+}) = 1,5 \times 10^{-4} \text{ mol.}$$

La concentration finale en ions plomb (II) est telle que :

$$[\text{Pb}^{2+}] = \frac{n_f(\text{Pb}^{2+})}{V} = 7,5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$Q_{r,f} = \frac{[\text{Sn}^{2+}]_f}{[\text{Pb}^{2+}]_f} = \frac{2,5 \times 10^{-3}}{7,5 \times 10^{-3}} = \frac{1}{3}.$$

Le quotient de réaction à l'état final est égal à la valeur de la constante d'équilibre. Le système a donc atteint un état d'équilibre.

10 Évaluer une constante d'équilibre

1. Calcul des quantités de matière et des concentrations des différentes espèces :

| Ions | $\text{Fe}^{3+} (\text{aq})$ | $\text{Fe}^{2+} (\text{aq})$ |
|---|--|---|
| $M (\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$ du sel dont provient l'ion | $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3, 9 \text{ H}_2\text{O}$ $M = 241,9 + 9 \times 18 = 403,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ | $\text{FeSO}_4, 7 \text{ H}_2\text{O}$ $M = 151,9 + 7 \times 18 = 277,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| Quantité n_i (mol) | $3,00 \times 10^{-3}$ | $3,13 \times 10^{-3}$ |
| Concentration initiale $\frac{n_i}{V}$ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) | $1,20 \times 10^{-2}$ | $1,25 \times 10^{-2}$ |

| Ions | $\text{Ag}^+ (\text{aq})$ |
|---|--|
| $M (\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$ du sel dont provient l'ion | AgNO_3 $M = 169,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| Quantité n_i (mol) | $3,77 \times 10^{-3}$ |
| Concentration initiale $\frac{n_i}{V}$ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) | $1,51 \times 10^{-2}$ |

$$Q_{r,i} = \frac{[\text{Ag}^+]_i \times [\text{Fe}^{2+}]_i}{[\text{Fe}^{3+}]_i \times c^\circ} = 1,57 \times 10^{-2}.$$

2. Si la masse d'argent diminue au cours de la transformation, c'est donc que la transformation évolue dans le sens direct de l'équation, donc $Q_{r,i} < K$ soit $1,57 \times 10^{-2} < K$.

3. On calcule les concentrations des espèces :

| Ions | $\text{Fe}^{3+} (\text{aq})$ | $\text{Fe}^{2+} (\text{aq})$ | $\text{Ag}^+ (\text{aq})$ |
|---|------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Concentration initiale $\frac{C_i \times V_i}{V_{\text{tot}}}$ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) | $3,0 \times 10^{-5}$ | $2,5 \times 10^{-2}$ | $2,0 \times 10^{-3}$ |

$$Q_{r,i} = \frac{[\text{Ag}^+]_i \times [\text{Fe}^{2+}]_i}{[\text{Fe}^{3+}]_i \times c^\circ} = 1,67.$$

4. Puisque de l'argent solide Ag (s) se forme, c'est donc que la transformation évolue dans le sens indirect de l'équation, donc $Q_{r,i} > K$ soit $K < 1,67$. On en déduit : $1,57 \times 10^{-2} < K < 1,67$.

11 Reconnaître des demi-piles

Une demi-pile est composée d'un couple oxydant / réducteur et si le réducteur n'est pas un élément métallique d'une électrode inerte (platine ou carbone graphite).

1^{er} système : couple $\text{Cu}^{2+} (\text{aq}) / \text{Cu (s)}$, le cuivre solide Cu (s) joue le rôle d'électrode \Rightarrow demi-pile ;

2^e système : couple $\text{Fe}^{3+} (\text{aq}) / \text{Fe}^{2+} (\text{aq})$, le platine solide Pt (s) joue le rôle d'électrode \Rightarrow demi-pile ;

3^e système : le couple $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H (aq)} / \text{CH}_3\text{CO}_2^- (\text{aq})$ est un couple acide-base. Le système ne peut correspondre à une demi-pile.

12 Identifier une pile

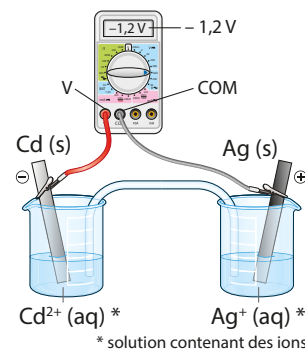
• Schéma a) : il ne s'agit pas d'une pile car le réducteur et l'oxydant ne sont pas associés.

• Schéma b) : il ne s'agit pas d'une pile car il manque le pont-salin.

• Schéma c) : il s'agit d'une pile.

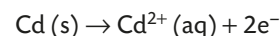
13 Identifier la polarité

1.

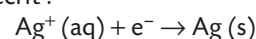


2. • L'électrode d'argent est la borne positive de la pile car elle a été branchée à la borne COM du voltmètre et la tension mesurée est négative. Les électrons circulent donc de l'électrode de cadmium vers l'électrode d'argent.

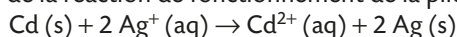
• L'électrode de cadmium fournit les électrons au circuit extérieur, le cadmium s'oxyde. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit :



• À l'électrode d'argent, les électrons arrivent et sont captés par les ions argent (I) qui sont réduits. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit :



• En combinant les deux équations des réactions électrochimiques, l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile s'écrit :



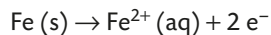
3. Le transfert d'électrons se réalise par un circuit extérieur. Le transfert est donc indirect.

14 Utiliser un ampèremètre

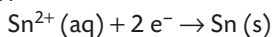
1. L'intensité du courant électrique est négative donc le courant circule de la borne d'étain vers la borne de fer dans le circuit extérieur.

2. • Les sens de circulation des électrons est opposé à celui du sens conventionnel du courant.

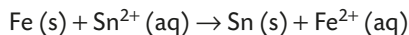
• L'électrode de fer fournit les électrons au circuit extérieur, le fer s'oxyde. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit :



• À l'électrode d'étain, les électrons arrivent et sont captés par les ions étain (II) qui sont réduits. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit :



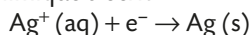
L'équation de fonctionnement s'écrit :



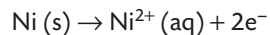
3. La séparation des réactifs dans deux demi-piles permet d'imposer un transfert indirect d'électrons passant par le circuit extérieur.

15 Déterminer la capacité électrique d'une pile

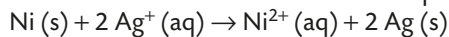
1. • Les ions argent (I) sont réduits, donc les électrons arrivent et sont captés par les ions argent (I) au niveau de l'électrode d'argent qui joue donc le rôle de la borne positive. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit :



• L'électrode de nickel Ni (s) fournit les électrons au circuit extérieur, le nickel s'oxyde. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit :



• En combinant les deux équations des réactions électrochimiques, l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile s'écrit :



2. Les quantités initiales de réactifs sont :

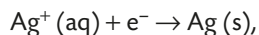
$$n_i(\text{Ni}) = \frac{m(\text{Ni})}{M(\text{Ni})} = \frac{25 \text{ g}}{58,7 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}} = 4,3 \times 10^{-1} \text{ mol}$$

$$\text{et } n_i(\text{Ag}^+) = [\text{Ag}^+] \times V = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Les ions argent (I) correspondent au réactif limitant car

$$\frac{n_i(\text{Ni})}{1} > \frac{n_i(\text{Ag}^+)}{2}$$

D'après l'équation de la réaction électrochimique :



$$\text{soit } n(\text{e}^-)_{\text{max}} = n_i(\text{Ag}^+)$$

$$\text{donc } Q_{\text{max}} = n(\text{e}^-)_{\text{max}} \times N_A \times e = n_i(\text{Ag}^+) \times N_A \times e = 4,8 \times 10^2 \text{ C.}$$

16 Évaluer des variations de quantités

1. $Q = I \times \Delta t = 10 \times 10^{-3} \text{ A} \times 3,0 \times 3\,600 \text{ s} = 108 \text{ C.}$

$$\begin{aligned} 2. \bullet n(\text{e}^-)_{\text{max}} &= \frac{Q_{\text{max}}}{(N_A \times e)} \\ &= \frac{108 \text{ C}}{(6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ C})} \\ &= 1,12 \times 10^{-3} \text{ mol} \end{aligned}$$

• $n(\text{e}^-) = n(\text{Ag}^+)_{\text{consommés}}$ d'où $n(\text{Ag}^+)_{\text{consommés}} = 1,12 \times 10^{-3} \text{ mol.}$

⇒ variation de la concentration en ions Ag^+ :

$$\Delta[\text{Ag}^+] = \frac{n(\text{Ag}^+)_{\text{consommés}}}{V} = 2,24 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

$$\Rightarrow n(\text{Ni})_{\text{consommés}} = \frac{n(\text{Ag}^+)_{\text{consommés}}}{2} = 5,60 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

• variation de masse de l'électrode de nickel :

$$\Delta m = n(\text{Ni})_{\text{consommés}} \times M(\text{Ni}) = 0,033 \text{ g.}$$

17 Identifier des oxydants et des réducteurs (1)

1. Les ions hypochlorite $\text{ClO}^- \text{(aq)}$ sont des oxydants.

2. L'acide ascorbique, le dioxygène ne contiennent pas l'élément chlore et sont également des oxydants.

18 Identifier des oxydants et des réducteurs (2)

1. Pour la pile **a**, l'oxydant est le dioxygène $\text{O}_2 \text{(g)}$ et le réducteur Li (s).

Pour la pile **b**, l'oxydant est le dioxygène $\text{O}_2 \text{(g)}$ et le réducteur le dihydrogène $\text{H}_2 \text{(g)}$.

2. L'élément lithium est dans la 1^{re} colonne du tableau périodique (alcalins) car sa configuration électronique se termine en $(2s)^1$.

3. Le métal lithium a tendance à perdre l'électron contenu dans l'orbitale 2s pour atteindre la configuration du gaz noble hélium. Cela lui confère donc un caractère réducteur.

Exercices

S'entraîner

p. 147

19 Connaître les critères de réussite

Un écran alimenté avec un citron !

Chaque trombone est parcouru par la même intensité de courant. Pour chaque trombone, il faut donc une masse minimale identique.

• Détermination de la masse m_0 de zinc déposé sur chaque trombone :

– Volume de la couche de zinc :

$$V = S \times e = (2\pi \times R \times L + \pi \times R^2) \times e.$$

$$\text{Application numérique : } V = 6,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

– Masse m_0 la couche de zinc de chaque trombone :

$$m_0 = \rho(\text{Zn}) \times V.$$

$$\text{Application numérique : } m_0 = 4,5 \times 10^{-2} \text{ g.}$$

• Détermination de la masse m de zinc réagissant lors de l'électrolyse sur chaque trombone :

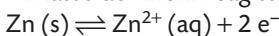
– Quantité d'électricité : $Q = I \times \Delta t.$

$$\text{Application numérique : } Q = 3,0 \text{ C.}$$

– Quantité de matière d'électrons circulant :

$$n_e = \frac{Q}{N_A \times e} = 3,1 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

– Masse de zinc m réagissant :



$$\text{soit } \frac{n(\text{Zn})}{1} = \frac{n(\text{e}^-)}{2} \text{ et } m(\text{Zn}) = \frac{n(\text{e}^-) \times M(\text{Zn})}{2}$$

$$\text{Application numérique : } m = 1,0 \times 10^{-3} \text{ g.}$$

• $m < m_0$ donc la masse de zinc transformée est inférieure à de la masse de zinc recouvrant chaque trombone. La masse de zinc déposée sur le trombone permet donc à la pile d'alimenter l'écran pendant une durée $\Delta t = 5 \text{ min}$ si l'intensité I du courant est égale à 10 mA.

20 À chacun son rythme

Contamination au plomb

1. • L'eau potable ne doit pas contenir plus de 50 mg d'ion plomb (II) $\text{Pb}^{2+} \text{(aq)}$ par litre d'eau

$$\Rightarrow [\text{Pb}^{2+}]_{\text{max}} = \frac{t_m(\text{Pb}^{2+})}{M(\text{Pb})}$$

$$\text{Application numérique : } [\text{Pb}^{2+}]_{\text{max}} = 2,4 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}.$$

• La concentration maximale autorisée en ion sulfate $\text{SO}_4^{2-} \text{(aq)}$ dans une eau potable est égale à 250 mg $\cdot \text{L}^{-1}$

$$\Rightarrow [\text{SO}_4^{2-}]_{\text{max}} = \frac{t_m(\text{SO}_4^{2-})}{M(\text{SO}_4^{2-})}$$

$$\text{Application numérique :}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{max}} = 2,60 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}.$$

$$2. Q_{r,i} = \frac{(c^o)^2}{[Pb^{2+}]_i \times [SO_4^{2-}]_i} = \frac{1^2}{2,4 \times 10^{-4} \times 2,60 \times 10^{-3}}$$

$$Q_{r,i} = 1,6 \times 10^6.$$

3. $K = 1,6 \times 10^{-3} < Q_{r,i} \Rightarrow$ si la transformation évolue, elle évolue dans le sens opposé de l'équation (dissolution du précipité). Il ne se forme pas de sulfate de plomb solide $PbSO_4(s)$.

4. Il n'est donc pas envisageable d'éliminer les ions plomb (II) par précipitation du sulfate de plomb puisque cette réaction n'est pas spontanée.

21 La pluie d'or

1. • Détermination des concentrations initiales :

$$[Pb^{2+}] = \frac{m(PbNO_3)}{M(PbNO_3) \times V} = 0,30 \text{ mol} \cdot L^{-1}$$

$$\text{et } [I^-] = \frac{m(KI)}{M(KI) \times V} = 0,60 \text{ mol} \cdot L^{-1}.$$

• Détermination du quotient de réaction $Q_{r,i}$:

$$Q_{r,i} = \frac{(c^o)^3}{[Pb^{2+}]_i \times [I^-]_i^2} = 9,3 < K(25^\circ C)$$

$Q_{r,i} = 7,4 \times 10^7$, donc le système évolue dans le sens direct de l'équation et il y a formation de cristaux de $PbI_2(s)$.

2.

| Équation de la réaction | | $Pb^{2+}(aq) + 2 I^-(aq) \rightleftharpoons PbI_2(s)$ | | |
|-------------------------|-------------------|---|--------------------|--------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | | |
| | | $n(Pb^{2+})$ | $n(I^-)$ | $n(PbI_2)$ |
| État initial | $x = 0$ | 15 | 30 | 0 |
| État final | $x = x_f$ | $15 - x_f = 0,075$ | $30 - 2x_f = 0,15$ | $x_f = 14,9$ |

Soit $x_f \approx 14,9$ mmol et comme $x_{max} = 15$ mmol, donc $\tau = 99\%$. La transformation peut être considérée comme quasi-totale.

$$Q_{r,A} \approx \frac{(c^o)^3}{[Pb^{2+}]_A \times [I^-]_A^2} = 7,4 \times 10^7 = K(25^\circ C)$$

donc le système a atteint un état d'équilibre.

3. a. Aucune concentration n'a été modifiée donc :

$$Q_{r,B} = Q_{r,A} = 7,4 \times 10^7.$$

b. La solution est devenue limpide, cela signifie qu'en augmentant la température, le système a évolué dans le sens indirect de l'équation, donc :

$$Q_{r,B} = K(25^\circ C) > K(70^\circ C).$$

c. En augmentant la température, la constante d'équilibre K diminue.

4. Lorsque la température diminue, la constante d'équilibre augmente et devient supérieure au quotient de réaction. Le système évolue de nouveau dans le sens direct de l'équation, d'où la formation de cristaux d'iodure de plomb $PbI_2(s)$.

5. Dans la solution filtrée, $[Pb^{2+}] = [Pb^{2+}]_{\text{éq}}$ et $[I^-] = [I^-]_{\text{éq}}$ donc

$$Q_{r,i} = K = \frac{(c^o)^3}{[Pb^{2+}]_{\text{éq}} \times [I^-]_{\text{éq}}^2}.$$

En ajoutant une pointe de spatule de nitrate de plomb, on augmente la concentration des ions plomb (II). Le quotient de réaction diminue et devient inférieure à la constante d'équilibre. Le système évolue alors dans le sens direct de l'équation. Des cristaux d'iodure de plomb $PbI_2(s)$ se forment.

22 Les avions hybrides

1. Le dispositif évoqué dans la dernière phrase en gras est une pile.

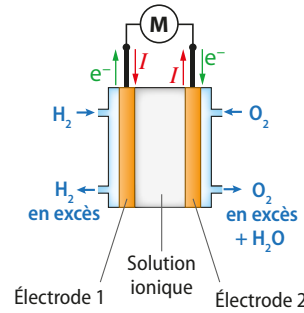
2. Le réducteur est le dihydrogène $H_2(g)$ et l'oxydant est le dioxygène $O_2(g)$.

Les équations des réactions électrochimiques sont :

• Électrode 1 : $H_2(g) \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (oxydation)

• Électrode 2 : $O_2(g) + 4 H^+ + 4 e^- \rightleftharpoons 2 H_2O(l)$ (réduction)

3.



$$4. a. Q = I \times \Delta t = 100 \text{ A} \times 8,0 \text{ h} = 800 \text{ Ah} = 800 \text{ A} \times 3 \text{ 600 s} = 2,88 \times 10^6 \text{ C}.$$

$$b. n(e) = \frac{Q}{N_A \times e} = \frac{2,88 \times 10^6}{6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19}} = 29,9 \text{ mol}.$$

$$\text{Or } \frac{n(H_2)}{1} = \frac{n(e)}{2} = 15,0 \text{ mol}.$$

$$\text{Soit } m(H_2) = n(H_2) \times M(H_2) = 15,0 \text{ mol} \times 2,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 30,0 \text{ g}$$

$$c. \rho(H_2(g)) = \frac{m(H_2)}{V(H_2)}$$

$$\Rightarrow V(H_2) = \frac{m(H_2)}{\rho(H_2)} = \frac{30,0 \times 10^{-3} \text{ kg}}{9,0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 0,33 \text{ m}^3.$$

5. Cette valeur est relativement faible comparée au volume du kérosène. Il est possible d'aménager un petit réservoir pour stocker le dihydrogène.

23 Le diiode en solution aqueuse

1. La concentration en quantité de matière apportée en diiode I_2 s'exprime par :

$$C = \frac{t_m(I_2)}{M(I_2)} = \frac{t_m(I_2)}{2 \times 126,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = \frac{10 \text{ g} \cdot L^{-1}}{2 \times 126,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}$$

$$C = 3,9 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}.$$

La concentration en matière apportée est supérieure à la solubilité du diiode.

$$2. Q_{r,i} = \frac{[I_3^-]_i \times c^o}{[I_2]_i \times [I^-]_i} = 0 < K \text{ donc la transformation (2) évolue}$$

dans le sens direct de l'équation.

K ayant une valeur élevée, la transformation (2) est presque totale. Comme le diiode $I_2(aq)$ réagit, et pour que le quotient de réaction associé à l'équation de la réaction (1) reste égal à la constante d'équilibre, le diiode solide $I_2(s)$ se solubilise permettant ainsi de dissoudre plus de diiode solide $I_2(s)$ que ne le prévoyait la solubilité du diiode.

3. • Détermination de la concentration des ions iodure $I^- (aq)$ à l'état final :

$$Q_{r2,f} = K = 750 = \frac{[I_3^-]_f \times c^o}{[I_2]_f \times [I^-]_f} \Rightarrow [I^-]_f = \frac{[I_3^-]_f \times c^o}{[I_2]_f \times K}.$$

Application numérique :

$$[I^-]_f = \frac{6,02 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}}{1,34 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1} \times 750} = 6,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}.$$

• Détermination de la quantité des ions iodure $I^- (aq)$ ayant réagi :
– Quantité n_0 d'ions iodure $I^- (aq)$ initial :

$$n_0 = \frac{m(KI)}{M(KI)} = \frac{2,0 \text{ g}}{166 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

– Quantité n_f d'ions iodure $I^- (aq)$ à l'état final :

$$n_f = [I^-]_f \times V = 6,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1} \times 0,100 \text{ L} = 6,0 \times 10^{-4} \text{ mol}.$$

– Quantité n d'ions iodure $I^- (aq)$ ayant réagi :

$$n = n_0 - n_f = 1,2 \times 10^{-2} \text{ mol} - 6,0 \times 10^{-4} \text{ mol} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

24 Résolution de problème

Mission Apollo

1^{re} étape : Bien comprendre la question posée

1. La production électrique des trois piles à combustible satisfait-elle la consommation électrique ?
2. Les stocks de dihydrogène $H_2(g)$ et de dioxygène $O_2(g)$ sont-ils suffisants pour le fonctionnement des piles et dans le cas du dioxygène pour la respiration des trois astronautes pendant 14 jours ?
3. Les piles à combustibles produisent-elles suffisamment d'eau $H_2O(l)$ pour satisfaire la consommation des trois astronautes pendant 14 jours ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. L'équipage est constitué de trois astronautes et la durée de la mission est de 14 jours.
2. Les besoins en dioxygène pour la respiration de l'équipage et les besoins en eau sont indiqués par jour et par membre d'équipage.
3. L'eau est produite par trois piles à combustible.
4. Les trois piles à combustible fournissent l'énergie électrique nécessaire. Elles utilisent le dihydrogène $H_2(g)$ et le dioxygène $O_2(g)$ qui sont stockés.

3^e étape : Dégager la problématique

Déterminer les besoins en énergie, en eau $H_2O(l)$ en dioxygène $O_2(g)$, et en dihydrogène $H_2(g)$ et les comparer à la production et aux stocks, puis conclure.

4^e étape : Construire la réponse

- Déterminer, pour la durée de la mission les besoins :
 - en énergie électrique ;
 - en dihydrogène $H_2(g)$;
 - en dioxygène $O_2(g)$;
 - en eau $H_2O(l)$.
- Déterminer, pour la durée de la mission la production d'énergie électrique et d'eau.
- Comparer les besoins à la production et au stock. Conclure.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

Le programme Apollo a permis d'envoyer trois astronautes sur la Lune. La mission était d'une durée de 14 jours. Dans le vaisseau, l'énergie électrique était produite par trois piles à combustible qui devaient aussi satisfaire les besoins en eau $H_2O(l)$ de l'équipage. Ces trois piles étaient alimentées par du dihydrogène $H_2(g)$ et du dioxygène $O_2(g)$ stockés dans des réservoirs devant être bien dimensionnés.

- Mettre en forme la réponse.

Consommation

- Consommation électrique :

La puissance électrique $\mathcal{P}_{\text{elec}}$ moyenne consommée est de 1,70 kW donc l'énergie électrique \mathcal{E}_c consommée est telle que :
 $\mathcal{E}_c = \mathcal{P}_c \times \Delta t = 1,70 \times 10^3 \times 14 \times 24 \times 3600 = 2,1 \times 10^9 \text{ J}$.

- Consommation de dihydrogène $H_2(g)$:

Pour produire une énergie de 1,0 kW pendant une heure c'est-à-dire $1,0 \times 10^3 \times 3600 = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$, il faut $n(H_2) = 21$ moles de dihydrogène, soit une masse :

$$m(H_2) = n(H_2) \times M(H_2) = 21 \text{ mol} \times 2 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 42 \text{ g}.$$

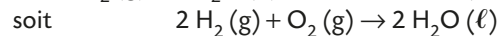
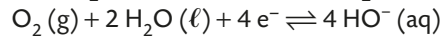
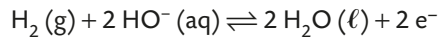
La consommation de H_2 pour la production électrique est :

$$\frac{42 \text{ g} \times 2,1 \times 10^9}{3,6 \times 10^6} = 24,5 \text{ kg}.$$

- Consommation de dioxygène $O_2(g)$:

Il faut 0,82 kg de dioxygène par jour et par astronaute ; soit, pour trois astronautes et pendant 14 jours, la masse de dioxygène nécessaire est telle que : $0,82 \times 14 \times 3 = 34,4 \text{ kg}$.

Pour prévoir la quantité de dioxygène nécessaire pour la production électrique, il convient d'écrire l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile :



Pour produire 1 kWh = $3,6 \times 10^6 \text{ J}$, on a donc :

$$\frac{n(O_2)}{1} = \frac{n(H_2)}{2} \Rightarrow n(O_2) = \frac{21}{2} = 10,5 \text{ mol},$$

soit $m(O_2) = n(O_2) \times M(O_2) = 336 \text{ g}$.

La consommation de O_2 pour la production électrique est :

$$\frac{336 \text{ g} \times 2,1 \times 10^9}{3,6 \times 10^6} = 196 \text{ kg}$$

\Rightarrow la consommation de O_2 est donc de : $196 + 34,4 = 230 \text{ kg}$.

- Consommation d'eau $H_2O(l)$:

Chaque astronaute consomme 4,0 kg d'eau par jour soit pour trois astronautes 12,0 kg d'eau

\Rightarrow la consommation de H_2O est donc de : $12,0 \times 14 = 168 \text{ kg}$.

Production

- Production électrique :

Les trois piles à combustible fournissent une puissance \mathcal{P}_p totale de $3 \times 1,4 \text{ kW} = 4,2 \text{ kW}$.

L'énergie électrique \mathcal{E}_p produite est telle que :

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{P}_p \times \Delta t = 4,2 \times 10^3 \times 14 \times 24 \times 3600 = 5,1 \times 10^9 \text{ J}.$$

\Rightarrow Comme $\mathcal{E}_p > \mathcal{E}_c$, le système électrique est bien dimensionné pour satisfaire les besoins électriques à conditions que les stocks en dihydrogène H_2 et dioxygène O_2 soient suffisants.

- Stock de dihydrogène H_2 :

Le réservoir contient 25,6 kg de dihydrogène H_2 . La consommation est de 24,5 kg. Le stock de dihydrogène H_2 répond aux besoins.

- Stock de dioxygène O_2 :

Le réservoir contient 294 kg de dioxygène O_2 . La consommation est de 230 kg. Le stock de dioxygène O_2 est bien conditionné.

- Production d'eau potable :

La pile produit pour 1 kWh = $3,6 \times 10^6 \text{ J}$, une quantité d'eau telle

que $\frac{n(H_2O)}{1} = \frac{n(H_2)}{1}$.

Soit $n(H_2O) = n(H_2) = 21 \text{ mol}$,

soit une masse $m(H_2O) = n(H_2O) \times M(H_2O) = 378 \text{ g}$.

La production d'eau est : $\frac{378 \text{ g} \times 2,1 \times 10^9}{3,6 \times 10^6} = 221 \text{ kg}$.

\Rightarrow la production d'eau est donc de 221 kg.

La consommation est de 168 kg. Les piles produisent suffisamment d'eau.

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

Le système de production électrique et les réservoirs attenants sont correctement proportionnés pour permettre le bon déroulement d'une mission de 14 jours pour trois astronautes.

25 La formation des stalactites et stalagmites

1. $CO_2(g) + H_2O(l) \rightleftharpoons CO_2(aq), H_2O(aq)$

2. $Q_{r1} = \frac{[Ca^{2+}] \times [HCO_3^-]^2}{[CO_2, H_2O] \times (c^0)^2}$.

3. a. Les constantes d'équilibre s'écrivent :

$$K_2 = \frac{[Ca^{2+}]_{\text{éq}} \times [CO_3^{2-}]_{\text{éq}}}{(c^0)^2} ; K_3 = \frac{[HCO_3^-]_{\text{éq}} \times c^0}{[CO_3^{2-}]_{\text{éq}} \times [H^+]_{\text{éq}}}$$

$$K_4 = \frac{[HCO_3^-]_{\text{éq}} \times [H^+]_{\text{éq}}}{[CO_2, H_2O]_{\text{éq}} \times c^0}$$

$$K_2 \times K_3 \times K_4 = \frac{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{éq}} \times [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{éq}}}{(c^\circ)^2} \times \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \times c^\circ}{[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{éq}} \times [\text{H}^+]_{\text{éq}}} \times \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}^+]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}} \times c^\circ}$$

$$K_2 \times K_3 \times K_4 = \frac{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{éq}} \times [\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}^2}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}} \times (c^\circ)^2}$$

b. On constate que : $K_1 = K_2 \times K_3 \times K_4$. A.N. : $K_1 = 10^{-4,3}$.

4. À l'état d'équilibre, $Q_{r1} = K_1$.

5. La réaction d'équation (1) n'est pas totale, les réactifs et les produits sont présents à l'état d'équilibre soit : $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$, $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$, $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$ et $\text{CaCO}_3(\text{s})$.

6. Lorsque la solution « s'étire », la concentration en $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$ diminue. Aussi comme :

$$Q_{r1} = \frac{[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}] \times (c^\circ)^2}, Q_{r1} \text{ augmente et devient supérieur à } K_1.$$

K_1 . La transformation évolue dans le sens inverse de l'équation.

7. Lorsque la concentration en $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ dissous diminue, la transformation évolue dans le sens de la précipitation de $\text{CaCO}_3(\text{s})$ (sens inverse de l'équation). Il se forme alors une concrétion : la stalactite.

8. Les gouttes d'eau chutent à faible vitesse sur le sol de la grotte. La solution s'étale, l'augmentation de la surface d'échange favorise l'élimination du $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$. La transformation évolue donc dans le sens inverse de l'équation (1) et favorise la formation de $\text{CaCO}_3(\text{s})$. Il se forme une concrétion : la stalagmite.

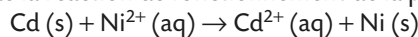
26 CORRIGÉ Des piles « rechargeables »

1. • L'électrode de cadmium est la borne négative de la pile car elle a été branchée à la borne COM du voltmètre et la tension mesurée est positive. Les électrons circulent donc de l'électrode de cadmium vers l'électrode de nickel.

• L'électrode de cadmium fournit les électrons au circuit extérieur, le cadmium s'oxyde. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit : $\text{Cd}(\text{s}) \rightarrow \text{Cd}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$

• À l'électrode de nickel, les électrons arrivent et sont captés par les ions nickel (II) qui sont réduits. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit : $\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{s})$

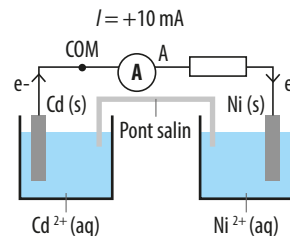
• En combinant les deux équations des réactions électrochimiques, l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile s'écrit :



2. $Q_{r,i} = \frac{[\text{Cd}^{2+}]_i}{[\text{Ni}^{2+}]_i} = 1$.

3. $Q_{r,i} < K = 4,5 \times 10^6$, donc la transformation évolue dans le sens direct de l'équation.

4. Le transfert spontané d'électrons est indirect.



5. • Le pont salin a pour fonction de fermer le circuit : il permet d'assurer la circulation du courant et la neutralité électrique des solutions.

• Si on ne séparait par les réactifs, le transfert d'électrons serait direct. Il serait alors impossible de récupérer l'énergie électrique.

6. • $n(\text{Ni}^{2+}) = C_{\text{Ni}} \times V = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$

$$\text{et } n(\text{Cd}) = \frac{m(\text{Cd})}{M(\text{Cd})} = 1,8 \times 10^{-2} \text{ mol},$$

soit $\frac{n(\text{Ni}^{2+})}{1} < \frac{n(\text{Cd})}{1}$ donc les ions nickel $\text{Ni}^{2+}(\text{aq})$ sont limitants.

• $\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{s})$

$$\text{soit } \frac{n(\text{e}^-)_{\text{max}}}{2} = n(\text{Ni}^{2+}) \text{ donc } n(\text{e}^-)_{\text{max}} = 2 \times n(\text{Ni}^{2+})$$

$$\text{soit } Q_{\text{max}} = n(\text{e}^-)_{\text{max}} \times N_A \times e = 2 \times n_i(\text{Ni}^{2+}) \times N_A \times e = 385 \text{ C}.$$

7. a. Le dioxygène $\text{O}_2(\text{g})$ est un oxydant.

b. Un atome de lithium a tendance à perdre un électron pour atteindre la configuration électronique d'un atome de gaz noble qui le précède. Le lithium est donc un réducteur.

8. $Q = n(\text{e}^-)_{\text{max}} \times N_A \times e$

$$\text{soit } n(\text{e}^-)_{\text{max}} = \frac{Q}{N_A \times e} = 4,48 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

$$\text{soit } n(\text{Li}^+) = n(\text{e}^-)_{\text{max}} = 4,48 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

La masse de l'élément lithium est égale à :

$$m(\text{Li}^+) = n(\text{Li}^+) \times M(\text{Li}) = 0,31 \text{ g}.$$

Vers le Bac

p. 150

Préparation à l'écrit

27 CORRIGÉ Solubiliser l'aspirine

1. On a $n(\text{HA})_i = \frac{m(\text{HA})_i}{M(\text{HA})} = 2,78 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

| Équation de la réaction | | $\text{HA}(\text{s}) \rightleftharpoons \text{HA}(\text{aq})$ | |
|-------------------------|-------------------|---|---------------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (mmol) | |
| | | $n(\text{HA}(\text{s}))$ | $n(\text{HA}(\text{aq}))$ |
| État initial | $x = 0$ | 2,78 | 0 |
| État final | $x = x_f$ | $2,78 - x_f = 2,32$ | $x_f = 0,458$ |

On a $x_f = 0,458 \text{ mmol}$ et $x_{\text{max}} = 2,78 \text{ mmol}$,

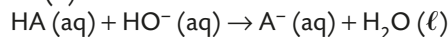
$$\text{soit } \tau = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = 16,5 \%. \text{ La transformation n'est pas totale.}$$

2. a. $Q_{r1,f} = \frac{[\text{HA}]_f}{c^\circ} = \frac{n(\text{HA})}{V \times c^\circ} = 1,83 \times 10^{-2}$.

b. À l'état final, le système a atteint un état d'équilibre, donc $K_1 = Q_{r1,f} = 1,83 \times 10^{-2}$.

c. Les espèces présentes dans le système sont : $\text{H}_2\text{O}(\ell)$, $\text{HA}(\text{s})$ et $\text{HA}(\text{aq})$.

3. L'équation (2) s'écrit :



4. a. L'ajout d'ions hydroxyde fait diminuer la concentration de l'acide acétylsalicylique $\text{HA}(\text{aq})$. Le quotient de réaction Q_{r1} diminue.

b. Si Q_{r1} diminue, il devient alors inférieur à K_1 . Le système évolue alors dans le sens direct de l'équation.

5. Puisque tout l'acide acétylsalicylique $\text{HA}(\text{s})$ s'est dissous, la transformation (1) est totale.

6. Si on ajoute de l'acide chlorhydrique à la solution, les ions hydronium réagissent avec l'acétylsalicylate A^- (aq) selon la réaction d'équation : A^- (aq) + H_3O^+ (aq) \rightarrow HA (aq) + H_2O (l). Le quotient de réaction Q_{r1} augmente car la concentration de HA (aq) augmente, il devient alors supérieur à K_1 . La transformation évolue alors dans le sens inverse de l'équation : des grains de cristaux d'acide acétylsalicylique se reforment.

28 Choisir une pile bouton

1. Les deux couples oxydant / réducteur intervenant dans la pile saline sont : ZnO (s) / Zn (s) et MnO_2 (s) / MnO_2H (s).

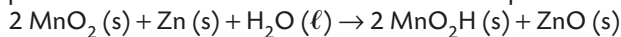
2. Les constituants ne doivent pas être mis en contact sinon le transfert d'électrons serait direct et aucune énergie électrique ne pourrait être récupérée.

3. • L'électrode de carbone est la borne positive de la pile car elle a été branchée à la borne COM du voltmètre et la tension mesurée est négative. Les électrons circulent donc de l'électrode de zinc vers l'électrode de carbone.

• L'électrode de carbone capte les électrons au circuit extérieur, MnO_2 se réduit. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit : MnO_2 (s) + H_2O (l) + e^- \rightarrow MnO_2H (s) + HO^- (aq)

• L'électrode de zinc fournit les électrons ; Zn (s) est oxydé en ZnO (s). L'équation de la réaction électrochimique s'écrit : Zn (s) + $2HO^-$ (aq) \rightarrow ZnO (s) + H_2O (l) + $2e^-$

• En combinant les deux équations des réactions électrochimiques, l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile s'écrit :



4. Les quantités initiales de réactifs sont :

$$n_i(MnO_2) = \frac{m(MnO_2)}{M(MnO_2)} = 3,45 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\text{et } n_i(Zn) = \frac{m(Zn)}{M(Zn)} = 1,53 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

Le zinc correspond au réactif limitant car $\frac{n_i(Zn)}{1} < \frac{n_i(MnO_2)}{2}$.

D'après l'équation de la réaction électrochimique :



$$n(e^-)_{\max} = 2 \times n_i(Zn) ;$$

$$\text{donc } Q_{\max} = n(e^-)_{\max} \times N_A \times e = 2 \times n_i(Zn) \times N_A \times e = 295 \text{ C.}$$

5.

| | Énergie de la pile $\mathcal{E} = U \times Q_{\max}$ (en J) | Masse m de la pile (en g) | Énergie pour 1 g de pile (en $J \cdot g^{-1}$) |
|----------|--|--------------------------------|--|
| Alcaline | 443 | 1,5 | 295 |

6. a. Le lithium joue le rôle de réducteur.

b. L'élément sodium appartient à la même famille que le lithium, il peut donc éventuellement être substitué à l'élément lithium.

7.

| | Énergie de la pile $\mathcal{E} = U \times Q_{\max}$ (en J) | Masse m de la pile (en g) | Énergie pour 1 g de pile (en $J \cdot g^{-1}$) |
|-------------------|---|--------------------------------|--|
| Alcaline | 443 | 1,5 | 295 |
| Oxyde d'argent | 705 | 1,3 | 542 |
| Lithium | 1 950 | 1,8 | 1 083 |

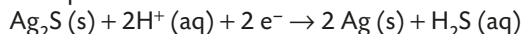
Les piles lithium sont les piles qui ont l'énergie par unité de masse la plus élevée. Elles peuvent donc stocker plus d'énergie et sont donc très utilisées. Leur durée de vie doit être plus grande.

Préparation à l'ECE

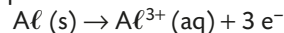
1. L'intensité du courant est positive. Sachant que la feuille d'aluminium est branchée à la borne COM de l'ampèremètre, le sens conventionnel du courant est donc dirigé de la cuillère vers la feuille d'aluminium. Le sens de circulation des électrons est inverse. La cuillère joue le rôle d'électrode positive car les électrons circulent de la borne négative vers la borne positive.

2. En l'absence de pont salin, tout se passe comme si un interrupteur ouvert était présent. Aucun courant ne pourrait donc circuler. L'intensité du courant serait donc nulle.

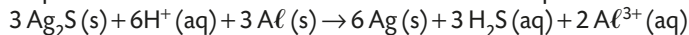
3. • La cuillère est la borne positive de la pile, les électrons arrivent et sont captés par Ag_2S (s) qui est réduit. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit :



• La feuille d'aluminium fournit les électrons au circuit extérieur, Al (s) s'oxyde. L'équation de la réaction électrochimique s'écrit :



• En combinant les deux équations des réactions électrochimiques, l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile s'écrit :



D'après l'équation de fonctionnement, il est donc envisageable d'éliminer le dépôt noir de sulfure d'argent et de redonner à l'objet un éclat argenté.

6. Lorsque l'on veut redonner de l'éclat à un objet argenté, il n'est pas nécessaire de réaliser un transfert indirect d'électrons, il suffit de mettre en contact les réactifs. Il suffit donc de placer l'objet à nettoyer entouré d'une feuille d'aluminium dans un récipient (saladier). On ajoute une solution de chlorure de sodium pour augmenter la conduction électrique. Un transfert direct d'électrons se réalise. L'expérience dure une dizaine de minutes.

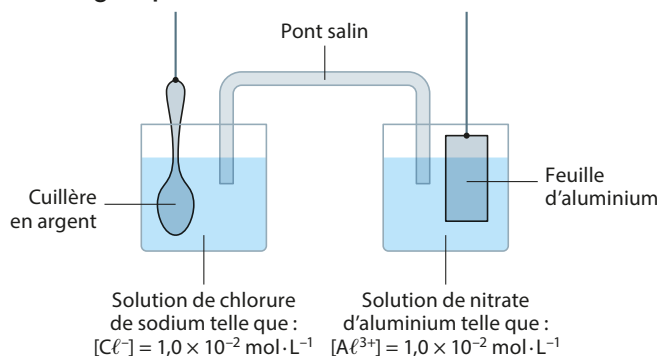
Sujet complet fourni dans la version numérique :

Redonner de l'éclat à de l'argent

L'éclat des objets recouverts d'argent Ag (s) (bijoux, orfèvrerie, etc.) s'altèrent au fil du temps du fait de l'apparition d'un film noir de sulfure d'argent Ag_2S (s). La formation de ce solide résulte de l'action conjuguée du dioxygène atmosphérique et du sulfure d'hydrogène H_2S (présent dans l'atmosphère).

Le but de cette épreuve est d'élaborer une méthode permettant, à la maison, de redonner un éclat à des objets recouverts d'argent.

A Montage expérimental



Matériel mis à disposition :

- Deux béciers de 100 mL.
- Un pont salin.
- Un objet argenté.
- Une feuille d'aluminium.
- Des pinces crocodiles.
- Un voltmètre.
- Un ampèremètre.
- Résistance $R = 1 \Omega$.
- Cinq fils électriques.
- Une pissette d'eau distillée.
- Un flacon étiqueté « solution de chlorure de sodium » contenant 100 mL d'une solution aqueuse de chlorure de sodium telle que $[Cl^-] = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.
- Un flacon étiqueté « solution de nitrate d'aluminium » contenant 100 mL d'une solution aqueuse de nitrate d'aluminium telle que $[Al^{3+}] = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

- Une paire de gants.
- Une paire de lunettes.
- Éprouvette de 50 mL.
- Un saladier en verre ou cristallin.
- Un flacon étiqueté « solution de chlorure de sodium » contenant 100 mL d'une solution aqueuse de chlorure de sodium telle que $[Cl^-] = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

Données

- $Ag_2S(s) / Ag(s) ; Al^{3+}(aq) / Al(s)$.
- $Ag_2S(s) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \rightarrow 2 Ag(s) + H_2S(aq)$

1. Polarité de la pile (30 min)

a. ANA-RAIS Compléter le schéma du dispositif expérimental (doc. A), afin de mesurer simultanément la tension aux bornes de la pile et l'intensité du courant débitée par cette pile si elle est reliée à une résistance $R = 1 \Omega$.

b. RÉA Faire les mesures de tension et d'intensité. Laisser la pile débiter pendant 10 minutes. Noter les observations.

c. ANA-RAIS En déduire la polarité de la pile, le sens de circulation des électrons et le sens conventionnel du courant.

APPEL n° 1

Appeler le professeur pour lui indiquer la polarité de la pile ou en cas de difficulté.

2. Élaboration d'un protocole (30 min)

a. RÉA Écrire l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile. La constante d'équilibre K , à 25 °C, de cette équation est égale à 10^{125} .

APPEL n° 2

Appeler le professeur pour lui présenter l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile ou en cas de difficulté.

b. VAL Exprimer puis calculer le quotient de réaction Q_r à l'état initial. En déduire le sens d'évolution du système. Est-il conforme aux observations (1.b.) ?

c. VAL Proposer une explication à l'utilisation de la solution de chlorure de sodium dans le bécher contenant l'objet en argent.

d. ANA-RAIS En utilisant le matériel et les solutions, proposer et justifier un protocole, réalisable facilement chez soi, qui permet de redonner à un objet argenté son éclat originel.

APPEL n° 3

Appeler le professeur pour lui présenter le protocole ou en cas de difficulté.

Défaire le montage et ranger la paillasse avant de quitter la salle.

Vers l'oral

p. 152

À deux, c'est mieux

Propositions de questions :

• **Question 1 :** Lorsque le système est à l'état d'équilibre, donner la relation entre le **quotient de réaction** et la **constante d'équilibre** associées à l'équation donnée.

Réponse

Le **quotient de réaction** Q_r est égal à la **constante d'équilibre** K si le système est à l'état d'équilibre.

• **Question 2 :** Déterminer la valeur de la **constante d'équilibre** associée à l'équation donnée.

Réponse

On détermine la **constante d'équilibre** grâce aux informations données pour le système 1 :

$$K = \frac{[Fe^{3+}]_e \times c^o}{[Fe^{2+}]_{\text{éq}} \times [Ag^+]_{\text{éq}}} = \frac{0,035 \times 1}{0,065 \times 0,165} = 3,3.$$

• **Question 3 :** Lorsque le système 2 est à l'état d'équilibre, déterminer la concentration des ions fer (III), Fe^{3+} notée $[Fe^{3+}]$.

Réponse

Puisque le système 2 est à l'état d'équilibre, le **quotient de réaction** Q_r est égal à la **constante d'équilibre** K soit :

$$K = \frac{[Fe^{3+}]_{\text{éq}} \times c^o}{[Fe^{2+}]_{\text{éq}} \times [Ag^+]_{\text{éq}}}$$

$$\Rightarrow [Fe^{3+}]_{\text{éq}} = \frac{K \times [Fe^{2+}]_{\text{éq}} \times [Ag^+]_{\text{éq}}}{c^o}$$

$$\Rightarrow [Fe^{3+}] = \frac{3,3 \times 0,15 \times 0,12}{1} = 0,059 \text{ mol} \cdot L^{-1}.$$

Je m'exprime à l'oral sur

L'évolution d'un système

• **Expliquer comment prévoir l'évolution d'un système.**

Pour prévoir l'évolution d'un système, il faut comparer le quotient de réaction Q_r et la constante d'équilibre K :

- si $Q_r < K$: la transformation évolue dans le sens direct de l'équation ;
- si $Q_r > K$: la transformation évolue dans le sens inverse de l'équation ;
- si $Q_r = K$: la transformation n'évolue plus car le système est à l'état d'équilibre.

• **Définir une transformation non totale ?**

Une transformation n'est pas totale si le taux d'avancement est inférieur à 1. Dans le cas de solution aqueuse, la transformation est alors modélisée par deux réactions opposées.

• **Comment savoir si un système est à l'état d'équilibre ?**

Un système est à l'état d'équilibre si toutes les espèces de l'équation coexistent et s'il n'y a plus d'évolution. Le quotient de réaction Q_r associé alors à l'équation est égal à la constante d'équilibre K .

8

Force des acides et des bases

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique | |
|---|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| B) Comparer la force des acides et des bases | |
| Constante d'acidité K_A d'un couple acide-base, produit ionique de l'eau K_e . | Associer K_A et K_e aux équations de réactions correspondantes. <i>Estimer la valeur de la constante d'acidité d'un couple acide-base à l'aide d'une mesure de pH.</i> |
| Réaction d'un acide ou d'une base avec l'eau, cas limite des acides forts et des bases fortes dans l'eau. | Associer le caractère fort d'un acide (d'une base) à la transformation quasi-totale de cet acide (cette base) avec l'eau. Prévoir la composition finale d'une solution aqueuse de concentration donnée en acide fort ou faible apporté. Comparer la force de différents acides ou de différentes bases dans l'eau. <i>Mesurer le pH de solutions d'acide ou de base de concentration donnée pour en déduire le caractère fort ou faible de l'acide ou de la base.</i> Capacité numérique : Déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, le taux d'avancement final d'une transformation, modélisée par la réaction d'un acide sur l'eau. Capacité mathématique : Résoudre une équation du second degré. |
| Diagrammes de prédominance et de distribution d'un couple acide-base ; espèce prédominante, cas des indicateurs colorés et des acides alpha-aminés. | Représenter le diagramme de prédominance d'un couple acide-base. Exploiter un diagramme de prédominance ou de distribution. Justifier le choix d'un indicateur coloré lors d'un titrage. Capacité numérique : Tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un couple acide-base de pK_A donné. |
| Solution tampon. | Citer les propriétés d'une solution tampon. |

Liens avec les programmes officiels de seconde, de première et de terminale

| | Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|-----------------|---|---|---|
| SECONDE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Transformation chimique. Réaction chimique. Equation de réaction. Espèce spectatrice, stœchiométrie, réactif limitant. | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer une quantité de matière. Déterminer une concentration en masse. Réaliser une gamme étalon. Établir une équation de réaction et l'ajuster. Déterminer le réactif limitant. | $t = \frac{m}{V}$ Réaction chimique. |
| Microscopique | Entités chimiques : molécules, atomes, ions. | | |
| PREMIÈRE | | | |
| Macroscopique | Acide carboxylique. | <ul style="list-style-type: none"> Tableau d'avancement. Avancements final et maximal. Composition de l'état final d'un système. Relier équivalence et introduction des réactifs en proportions stœchiométriques. Relier les quantités de matière de réactifs. | |
| Microscopique | | Déterminer une masse molaire à partir des masses molaires atomiques. | |

TERMINALE

| | | | |
|----------------------|--|---|--|
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Quotient de réaction, constante d'équilibre, constante d'acidité. Produit ionique de l'eau. Indicateur coloré. Solution tampon. | <ul style="list-style-type: none"> Acides forts, faibles ; bases fortes, faibles. Diagrammes prédominance et de distribution. Mesurer un pH. | $K_A = \frac{[A^-]_{\text{éq}} \times [H_3O^+]_{\text{éq}}}{[AH]_{\text{éq}}}$ $K_e = [H_3O^+]_{\text{éq}} \times [HO^-]_{\text{éq}}$ $K_A = 10^{-pK_A}$ $pK_A = -\log(K_A)$ |
| Microscopique | Transferts d'ion hydrogène H ⁺ . | | |

Activité 1

expérimentale Force des acides

p. 154

Capacités exigibles

- Associer le caractère fort d'un acide à la transformation quasi-totale de cet acide avec l'eau.
- Prévoir la composition finale d'une solution aqueuse de concentration donnée en acide fort ou faible apporté.
- Comparer la force de différents acides ou de différentes bases dans l'eau.
- Mesurer le pH de solutions d'acide ou de base de concentrations données pour en déduire le caractère fort ou faible de l'acide ou de la base.

Pratique expérimentale

1 pH(S₁) = 3,0 ; donc pour la solution S₁ :
 $[H_3O^+]_f = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

2 Pour un volume de solution V = 100 mL,
 $n = C \times V = 10 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

| | | | | |
|-----------------------------------|--|---------|-------|-------|
| Équation | $C_3H_6O_3(aq) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons C_3H_5O_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$ | | | |
| État initial (x = 0 mol) | $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ | Solvant | 0 | 0 |
| État en cours (x) | $n - x$ | Solvant | x | x |
| État final (x_f) | $n - x_f$ | Solvant | x_f | x_f |

3 a. L'avancement maximal x_{max} serait atteint si l'acide lactique était totalement consommé, soit si $n - x_{\text{max}} = 0$ d'où $x_{\text{max}} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

b. $x_f = n_f(H_3O^+) = [H_3O^+]_f \times V = 10^{-pH} \times V$
 $x_f = 10^{-3,0} \times 100,0 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

c. Le taux d'avancement final vaut : $\tau_1 = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = 0,10$.

4 • Pour la solution S₂ :

pH(S₂) = 3,4 ; donc pour la solution S₂ :

$[H_3O^+]_f = 10^{-3,4} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

Pour un volume de solution V = 100 mL,

$n = C \times V = 10 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

| | | | | |
|-----------------------------------|---|---------|-------|-------|
| Équation | $CH_3CO_2H(aq) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons CH_3CO_2^-(aq) + H_3O^+(aq)$ | | | |
| État initial (x = 0 mol) | $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ | Solvant | 0 | 0 |
| État en cours (x) | $n - x$ | Solvant | x | x |
| État final (x_f) | $n - x_f$ | Solvant | x_f | x_f |

L'avancement maximal x_{max} serait atteint si l'acide éthanoïque était totalement consommé, soit $x_{\text{max}} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

$x_f = n_f(H_3O^+) = [H_3O^+]_f \times V = 10^{-pH} \times V$

$x_f = 10^{-3,4} \times 100,0 \times 10^{-3} = 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol}$.

Le taux d'avancement final vaut : $\tau_2 = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = 0,040$.

• Pour la solution S₃ :

pH(S₃) = 2,0 ; donc pour la solution S₃ :

$[H_3O^+]_f = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

Pour un volume de solution V = 100 mL,

$n = C \times V = 10 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

| | | | | |
|-----------------------------------|--|---------|-------|-------|
| Équation | $HCl(g) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons Cl^-(aq) + H_3O^+(aq)$ | | | |
| État initial (x = 0 mol) | $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ | Solvant | 0 | 0 |
| État en cours (x) | $n - x$ | Solvant | x | x |
| État final (x_f) | $n - x_f$ | Solvant | x_f | x_f |

L'avancement maximal x_{max} serait atteint si l'acide chlorhydrique était totalement consommé, soit :

$x_{\text{max}} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

$x_f = n_f(H_3O^+) = [H_3O^+]_f \times V = 10^{-pH} \times V$

$x_f = 10^{-2} \times 100,0 \times 10^{-3}$

$x_f = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

Le taux d'avancement final vaut : $\tau_3 = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = 1,0$.

5 En utilisant le complément scientifique, on peut classer les acides en fonction des quantités d'ions oxonium calculées : l'acide méthanoïque est un acide moins fort que l'acide lactique qui est lui-même moins fort que l'acide chlorhydrique.

6 Ce sont les ions oxonium libérés par les acides qui permettent le détartrage, l'acide le plus efficace est donc l'acide le plus fort. Ainsi, pour une concentration en soluté apporté donnée, l'acide chlorhydrique est plus efficace que les acides lactique et éthanoïque pour le détartrage.

Un pas vers le cours

7 On peut comparer la force de différents acides dans l'eau en comparant le taux d'avancement final de la transformation de l'acide avec l'eau : pour une concentration en acide apporté donnée, plus le taux d'avancement final de la transformation de l'acide avec l'eau est grand, plus l'acide est fort.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Dans cette activité, la notion de force d'un acide est étudiée en déterminant le taux d'avancement final de la transformation d'un acide avec l'eau pour une concentration en acide apporté donnée. Cette notion a été contextualisée en s'intéressant au pouvoir détartrant de ces acides.

Activité 2

expérimentale Constante d'acidité K_A

p. 155

Capacité exigible

- Estimer la valeur de la constante d'acidité d'un couple acide-base à l'aide d'une mesure de pH.

Pratique expérimentale

1 $\text{pH}(S_0) = 2,9$.

2 a. Un comprimé d'aspirine contient 500 mg d'acide acétylsalicylique. Ce comprimé est dissout de façon à obtenir 500,0 mL de solution. La concentration en masse en acide acétylsalicylique de la solution obtenue est donc $t = 1,0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Cette valeur étant inférieure à la solubilité dans l'eau de l'acide acétylsalicylique, l'aspect non limpide de la solution n'est pas dû à un problème de solubilité de l'acide acétylsalicylique.

b. L'aspect non limpide de la solution peut être dû à la non solubilité d'un ou plusieurs des excipients du comprimé dans la solution préparée.

3

| Équation | $\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{C}_9\text{H}_7\text{O}_4^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ | | | |
|--------------------------------------|---|---------|-------|-------|
| État initial ($x = 0 \text{ mol}$) | n | Solvant | 0 | 0 |
| État en cours (x) | $n - x$ | Solvant | x | x |
| État final (x_f) | $n - x_f$ | Solvant | x_f | x_f |

4 a. La constante d'acidité est la constante d'équilibre de la réaction de l'acide avec l'eau donc :

$$K_A = \frac{[\text{C}_9\text{H}_7\text{O}_4^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4]_{\text{éq}}}$$

b. La stœchiométrie de la réaction permet d'écrire :

$$x_f = n_{\text{éq}}(\text{C}_9\text{H}_7\text{O}_4^-) = n_{\text{éq}}(\text{H}_3\text{O}^+);$$

$$\text{donc } [\text{C}_9\text{H}_7\text{O}_4^-]_{\text{éq}} \times V = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \times V$$

$$\text{soit } [\text{C}_9\text{H}_7\text{O}_4^-]_{\text{éq}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}.$$

$$\text{De plus, } n_{\text{éq}}(\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4) = n - x_f$$

$$\text{donc } [\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4]_{\text{éq}} \times V = C_0 \times V - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \times V$$

$$\text{soit } [\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4]_{\text{éq}} = C_0 - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}.$$

La constante d'acidité s'écrit donc :

$$K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}^2}{C_0 - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}$$

c. $K_A = 3,7 \times 10^{-4}$.

5 a.

| | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| K_A (de différents groupes) | $3,7 \times 10^{-4}$ | $6,3 \times 10^{-4}$ | $2,2 \times 10^{-4}$ | $1,3 \times 10^{-4}$ | $6,4 \times 10^{-4}$ |
| | $2,2 \times 10^{-4}$ | $8,1 \times 10^{-5}$ | $8,1 \times 10^{-4}$ | $1,3 \times 10^{-4}$ | |

On obtient : $\bar{K}_A = 2,8 \times 10^{-4}$.

b. L'incertitude type est : $u(K_A) = 7,3 \times 10^{-5} \approx 0,8 \times 10^{-4}$.

Donc $K_A = (2,8 \pm 0,8) \times 10^{-4}$.

6 a. La valeur donnée pour K_A appartient bien à l'intervalle de confiance déterminé expérimentalement.

b. Pour déterminer une constante d'acidité à partir d'une mesure de pH, il faut :

– déduire la valeur de $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ en utilisant la relation :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 10^{-\text{pH}};$$

– exprimer la constante d'acidité K_A en fonction de $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ et de C_0 :

$$K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}^2}{C_0 - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}};$$

– calculer la valeur de K_A .

Un pas vers le cours

7 a. On a $K_A = \frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{AH}]_{\text{éq}}}$. Or, plus l'acide est fort,

plus il est dissocié dans l'eau, donc plus les concentrations $[\text{A}^-]_{\text{éq}}$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ sont grandes et plus la concentration $[\text{AH}]_{\text{éq}}$ est petite. Ainsi, plus K_A est grand et $\text{p}K_A$ est petit.

b. Les tables répertoriant les valeurs des constantes d'acidité, permettent de comparer facilement la force des différents acides dans l'eau.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité nécessite la préparation par l'élève de la solution S_0 étudiée, ce qui permet de réviser le protocole de préparation d'une solution par dissolution d'un solide. Elle permet de réinvestir les notions de concentration en masse et de solubilité. Enfin, la mise en commun des résultats permet une étude statistique sur un ensemble de mesures.

Même si les résultats semblent très dispersés, il n'y a pas de résultat manifestement aberrant dans la série proposée ci-dessus, des écarts importants entre les valeurs des K_A sont attendus étant donné l'imprécision de la mesure du pH. Cependant, ces écarts sont « amoindris » en calculant le $\text{p}K_A$.

Capsules vidéos de cours :

- Les acides et les bases
- Diagramme de prédominance

QCM

p. 161

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

3 Associer une constante d'équilibre à une équation de réaction

1. La constante d'équilibre est :

$$K_e = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \times [\text{HO}^-]_{\text{éq}}$$

$$2. [\text{HO}^-]_{\text{éq}} = \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}} = \frac{1,0 \times 10^{-14}}{1,0 \times 10^{-4,6}} = 1,0 \times 10^{-9,4} = 4,0 \times 10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

4 Exploiter le produit ionique de l'eau

1. $K_e = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \times [\text{HO}^-]_{\text{éq}}$

2. $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = \frac{K_e}{[\text{HO}^-]_{\text{éq}}} = \frac{1,0 \times 10^{-14}}{3,2 \times 10^{-6}} = 3,1 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

3. $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = -\log (3,1 \times 10^{-9}) = 8,5$

5 Déterminer la composition finale d'une solution

| Équation | $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ |
|--------------------------------------|---|
| État initial ($x = 0 \text{ mol}$) | n Solvant 0 0 |
| État en cours (x) | $n - x$ Solvant x x |
| État final (x_f) | $n - x_f$ Solvant x_f x_f |

$$x_f = n_f(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \times V = 10^{-\text{pH}} \times V$$

$$x_f = 10^{-2,7} \times 500,0 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$n_f(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6) = n - x_f = 5,0 \times 10^{-3} - 1,0 \times 10^{-3} = 4,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\text{et } n_f(\text{H}_3\text{O}^+) = n_f(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6^-) = x_f = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

| | | | | |
|----------------------|----------|---------|----------|----------|
| État final (x_f) | 4,0 mmol | Solvant | 1,0 mmol | 1,0 mmol |
|----------------------|----------|---------|----------|----------|

6 Exploiter la composition finale d'une solution

1. $x_f = n_{\text{éq}}(\text{HO}^-) = 0,25 \text{ mmol} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$

$$[\text{HO}^-]_{\text{éq}} = \frac{n_{\text{éq}}(\text{HO}^-)}{V} = \frac{2,5 \times 10^{-3}}{100,0 \times 10^{-3}} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

2. $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = \frac{K_e}{[\text{HO}^-]_{\text{éq}}} = \frac{1,0 \times 10^{-14}}{2,5 \times 10^{-2}} = 4,0 \times 10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Donc $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = 12$

3. $n_f(\text{CH}_3\text{NH}_2) = C \times V - x_f$ soit :

$$C = \frac{n_f(\text{CH}_3\text{NH}_2) + x_f}{V} = \frac{7,5 \times 10^{-4} + 2,5 \times 10^{-4}}{100,0 \times 10^{-4}}$$

$$C = 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

7 Justifier le caractère fort d'un acide

1.

| Équation | $\text{HNO}_3(\ell) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{NO}_3^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ |
|--------------------------------------|---|
| État initial ($x = 0 \text{ mol}$) | $n = C \times V$ Solvant 0 0 |
| État en cours (x) | $n - x$ Solvant x x |
| État final (x_f) | $n - x_f$ Solvant x_f x_f |

2. $x_f = n_f(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \times V = 10^{-\text{pH}} \times V$

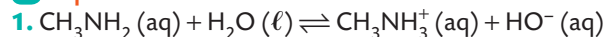
$$x_f = 10^{-2,3} \times 150,0 \times 10^{-3} = 7,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

L'avancement maximal x_{max} serait atteint si l'acide nitrique était totalement consommé, soit si $C \times V - x_{\text{max}} = 0$ d'où :

$$x_{\text{max}} = C \times V = 5,0 \times 10^{-3} \times 150,0 \times 10^{-3} = 7,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

Le taux d'avancement final vaut : $\tau = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = 1$. L'acide nitrique est un acide fort dans l'eau.

8 Exploiter un taux d'avancement final



2. $x_{\text{max}} = C \times V$; $x_f = n_f(\text{CH}_3\text{NH}_3^+) = n_f(\text{HO}^-)$;

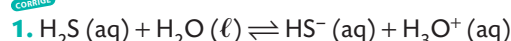
donc $[\text{CH}_3\text{NH}_3^+]_f \times V = [\text{HO}^-]_f \times V$; soit $[\text{CH}_3\text{NH}_3^+]_f = [\text{HO}^-]_f$.

$$\text{Or } \tau = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = \frac{[\text{CH}_3\text{NH}_3^+]_f \times V}{C \times V} = \frac{[\text{CH}_3\text{NH}_3^+]_f}{C}$$

$$\text{donc } [\text{CH}_3\text{NH}_3^+]_f = [\text{HO}^-]_f = \tau \times C = 0,22 \times 1,0 \times 10^{-2} = 2,2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\text{Et } [\text{CH}_3\text{NH}_2]_f = C - [\text{CH}_3\text{NH}_3^+]_f = 1,0 \times 10^{-2} - 2,2 \times 10^{-3} = 7,8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

9 Écrire une constante d'acidité

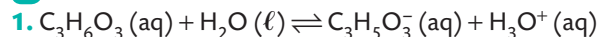


2. L'écriture simplifiée de la constante d'acidité est :

$$K_A = \frac{[\text{HS}^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{H}_2\text{S}]_{\text{éq}}}$$

3. $\text{p}K_A = -\log(K_A)$ ou $K_A = 10^{-\text{p}K_A}$

10 Calculer une constante d'acidité



2. $K_A = \frac{[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3]_{\text{éq}}}$

3. $[\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3]_{\text{éq}} = \frac{[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{K_A} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}^2}{10^{-\text{p}K_A}} = \frac{(2,5 \times 10^{-3})^2}{10^{-3,9}} = 50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

11 Comparer la force de différents acides

1. On a $K_A = 10^{-\text{p}K_A}$ et $\text{p}K_A = -\log(K_A)$:

| Couple | | K_A | $\text{p}K_A$ |
|---|-------------------------------------|----------------------|---------------|
| Acide | Base | | |
| $\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}$ | $\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}_2^-$ | $1,3 \times 10^{-5}$ | 4,9 |
| HClO | ClO^- | $3,2 \times 10^{-8}$ | 7,5 |
| HCO_2H | HCO_2^- | $1,6 \times 10^{-4}$ | 3,8 |
| H_3O^+ | H_2O | 1,0 | 0 |

2. À concentrations apportées égales, plus un acide est fort dans l'eau, plus son $\text{p}K_A$ est petit.

Classement par ordre croissant de la force des acides : HClO , $\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}$, HCO_2H , H_3O^+ .

12 Comparer la force de trois bases dans l'eau

À concentrations apportées égales, plus une base est forte dans l'eau, plus son $\text{p}K_A$ est grand et plus le taux d'avancement final est grand. Ainsi :

| Base | $\text{p}K_A$ | τ |
|--------------------------|---------------|----------------------|
| CH_3NH_2 | 10,6 | 0,25 |
| NH_2OH | 9,9 | 0,040 |
| NH_3 | 9,2 | $1,0 \times 10^{-3}$ |

13 Tracer un diagramme de prédominance

Comme $\text{pH} > \text{p}K_A$, l'espèce prédominante dans la solution est donc l'ion NO_2^- (aq).

Diagramme de prédominance :



14 Exploiter un diagramme de distribution

1. Lorsque le pH est voisin de 0, l'acide prédomine sur la base du couple. Ainsi, la courbe bleue est celle de l'acide benzoïque et la courbe verte est celle de l'ion benzoate.

2. On a $\text{pH} = \text{p}K_A$ à l'intersection des deux courbes. Graphiquement, $\text{p}K_A = 4,2$.

15 Justifier le choix d'un indicateur coloré

1. Un indicateur coloré acido-basique est un couple acide-base dont les espèces conjuguées n'ont pas la même teinte.

2. La phénolphtaléine est adaptée à ce titrage car le pH à l'équivalence est compris dans la zone de virage [8,0 – 10,0] de l'indicateur coloré.

16 Choisir un indicateur coloré pour un titrage

1. L'indicateur coloré adapté à ce titrage doit contenir la valeur $\text{pH}_E = 7,0$ dans sa zone de virage. Seul le bleu de bromothymol satisfait à cette condition car sa zone de virage est [6,0 – 7,6].

2. À l'équivalence de ce titrage, la couleur du mélange réactionnel passe du bleu au jaune.

17 Reconnaître un effet tampon

1. La solution S₃ pourrait être une solution tampon car son pH varie très peu lors de l'ajout d'une petite quantité d'acide.

2. Il faudrait voir comment évolue son pH lors de l'ajout d'une petite quantité de base ou d'eau.

18 Justifier l'utilisation d'une solution tampon

1. Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu par dilution ou par ajout de petites quantités d'acide ou de base.

2. Les solutions utilisées pour l'étalonnage des pH-mètres sont utilisées plusieurs fois, par des manipulateurs différents qui risquent d'y ajouter des petites quantités d'eau, d'acides ou de bases en plongeant la sonde du pH-mètre dans le flacon de la solution tampon. Une solution « non » tampon verrait donc son pH varier au fil des utilisations et ne serait rapidement plus utilisable.

Exercices

S'entraîner

p. 166

19 À chacun son rythme

Lutte biologique contre le varroa

1. Équation de la réaction entre l'acide méthanoïque et l'eau :

$$\text{HCO}_2\text{H}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{HCO}_2^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$$

2. Tableau d'avancement de la réaction entre l'acide lactique et l'eau :

| Équation | $\text{HCO}_2\text{H}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{HCO}_2^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ | | | |
|-----------------------------|---|---------|-------|-------|
| État initial ($x = 0$ mol) | $n = C \times V$ | Solvant | 0 | 0 |
| État en cours (x) | $n - x$ | Solvant | x | x |
| État final (x_f) | $n - x_f$ | Solvant | x_f | x_f |

3. L'avancement maximal x_{max} serait atteint si l'acide méthanoïque était totalement consommé, soit si $C \times V - x_{\text{max}} = 0$, d'où :

$$x_{\text{max}} = C \times V = 1,0 \times 0,60 = 6,0 \times 10^{-1} \text{ mol.}$$

4. L'avancement final x_f est :

$$x_f = n_f(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \times V = 10^{-\text{pH}} \times V = 7,6 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

5. La composition finale de la solution est :

$$n_f(\text{HCO}_2\text{H}) = C \times V - x_f = 1,0 \times 0,60 - 7,6 \times 10^{-3} = 5,9 \times 10^{-1} \text{ mol}$$

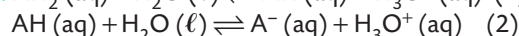
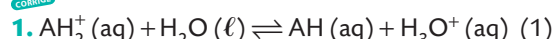
$$n_f(\text{H}_3\text{O}^+) = n_f(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6^-) = x_f = 7,6 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

6. $x_f < x_{\text{max}}$ ou le taux d'avancement final :

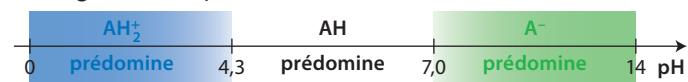
$$\tau = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = \frac{7,6 \times 10^{-3}}{6,0 \times 10^{-1}} = 0,013 < 1.$$

7. L'acide méthanoïque est un acide faible dans l'eau.

20 Les couleurs des hortensias



2. Diagramme de prédominance :



3. $\frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{AH}]_{\text{éq}}}$ constante d'acidité associée à l'équation (2)

et $\frac{[\text{AH}]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{AH}_2^+]_{\text{éq}}}$ constante d'acidité associée à l'équation (1).

4. À concentration apportée égale, l'acide le plus fort dans l'eau est celui qui a la plus petite valeur de $\text{p}K_A$.

Or $\text{p}K_{A1} < \text{p}K_{A2}$, donc l'acide $\text{AH}_2^+(\text{aq})$ est plus fort que l'acide $\text{AH}(\text{aq})$.

5. $K_{A2} = 10^{-\text{p}K_{A2}} = 10^{-7,0}$.

6. a. $\frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}}}{[\text{AH}]_{\text{éq}}} = \frac{K_{A2}}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}} = \frac{1,0 \times 10^{-7,0}}{1,0 \times 10^{-10,0}} = 1,0 \times 10^3$.

b. L'espèce $\text{A}^-(\text{aq})$ est donc prédominante dans la solution, la solution S est donc bleue.

7. Pour faire passer de rose à bleu les pétales d'un hortensia, il faut que le pH de la solution contenue dans les pétales augmente. Ce pH variant en sens inverse de celui du sol, il faut donc diminuer le pH du sol.

21 Python

Diagramme de distribution informatisé

Ressource pour le professeur à télécharger :
Fichier Python

1. a. $K_A = \frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{AH}]_{\text{éq}}}$.

b. $C = [\text{AH}]_{\text{éq}} + [\text{A}^-]_{\text{éq}}$.

2. a. On a : $[\text{A}^-]_{\text{éq}} = C - [\text{AH}]_{\text{éq}}$.

En reportant dans K_A : $K_A = \frac{(C - [\text{AH}]_{\text{éq}}) \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{AH}]_{\text{éq}}}$

soit $\frac{K_A}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}} = \frac{(C - [\text{AH}]_{\text{éq}})}{[\text{AH}]_{\text{éq}}}$ et $\frac{10^{-\text{p}K_A}}{10^{-\text{pH}}} = \frac{C}{[\text{AH}]_{\text{éq}}} - 1$.

D'où $\frac{C}{[\text{AH}]_{\text{éq}}} = 1 + \frac{10^{-\text{p}K_A}}{10^{-\text{pH}}} = 1 + 10^{\text{pH} - \text{p}K_A}$;

soit $\frac{[\text{AH}]_{\text{éq}}}{C} = \frac{1}{1 + 10^{\text{pH} - \text{p}K_A}}$.

Et finalement : $\%(\text{AH}) = 100 \times \frac{[\text{AH}]_{\text{éq}}}{C} = \frac{100}{1 + 10^{\text{pH} - \text{p}K_A}}$.

b. Pourcentage en base A⁻ :

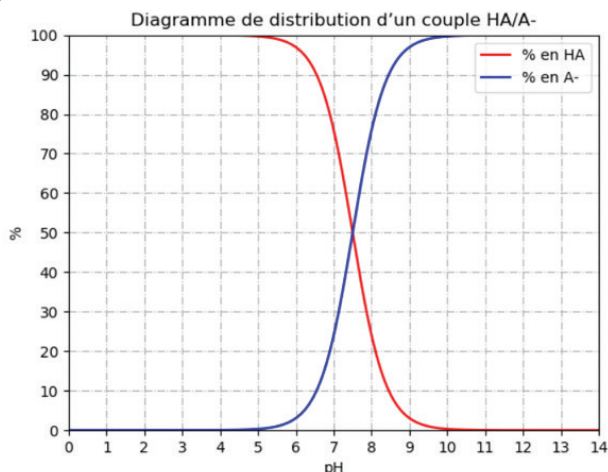
$$\%(A^-) = 100 - \%(AH) = 100 - \frac{100}{1 + 10^{pH - pK_A}}$$

$$\%(A^-) = 100 \left(1 - \frac{1}{1 + 10^{pH - pK_A}} \right) = 100 \left(\frac{10^{pH - pK_A}}{1 + 10^{pH - pK_A}} \right)$$

$$\%(A^-) = 100 \left(\frac{1}{1 + 10^{pK_A - pH}} \right)$$

3. Les lignes 4 et 5 du programme permettent de calculer respectivement les pourcentages en acide et en base.

4. Diagramme de distribution du couple HClO / ClO⁻ de pK_A égal à 7,5 :



Ressource pour le professeur à télécharger :
Fichier Python

5. À partir du graphe, déterminer les valeurs du pH telles que :

a. $\frac{[HClO]_{\text{éq}}}{[ClO^-]_{\text{éq}}} = 10$, soit $\frac{[ClO^-]_{\text{éq}}}{[HClO]_{\text{éq}}} = 0,10$

et $pH = pK_A + \log \left(\frac{[ClO^-]_{\text{éq}}}{[HClO]_{\text{éq}}} \right) = 7,5 + \log(0,10) = 6,5$.

b. $\frac{[HClO]_{\text{éq}}}{[ClO^-]_{\text{éq}}} = 0,1$, soit $\frac{[ClO^-]_{\text{éq}}}{[HClO]_{\text{éq}}} = 10$

et $pH = pK_A + \log \left(\frac{[ClO^-]_{\text{éq}}}{[HClO]_{\text{éq}}} \right) = 7,5 + \log(10) = 8,5$.

6. Programme modifié qui permet de tracer le diagramme de prédominance pour deux couples acide-base appliqué à l'exercice 20 :

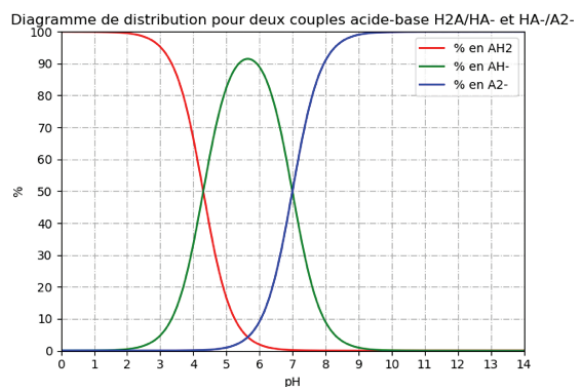
```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 pKA1=4.3
4 pKA2=7.0
5 pH = np.linspace(0,14,1000) # Tableau de 1 000
6 valeurs de pH entre 0 et 14
7 pHA = [100/(1+10**(i-pKA1)) for i in pH] # Calculs
8 des pourcentages en HA-
9 pA = [100/(1+10**(pKA2-i)) for i in pH] # Calculs
10 des pourcentages en A2-
11 pHA = [100-100/(1+10**(i-pKA1))-100/
12 (1+10**(i-pKA2-i)) for i in pH] # Calculs des
13 pourcentages en HA-
14 plt.title('Diagramme de distribution pour deux
15 couples H2A/HA- et HA-/A2-')
16 plt.xlabel('pH')
17 plt.ylabel('%')
18 plt.axis(xmin=3, xmax=13, ymin=0, ymax=100)
19 plt.xticks(range(15)) # Graduations axe pH de 0 à
20 14 par pas de 1
21 plt.yticks(range(0,110,10)) # Graduations axe %H de
22 0 à 100 % par pas de 10 %
23 plt.grid(linestyle='--')
24 plt.plot(pH, pHA, color='r', label='% en AH2')
25 plt.plot(pH, pA, color='g', label='% en AH-')
26 plt.plot(pH, pA, color='b', label='% en A2-')
27 plt.legend()
28 plt.show()

```

Ressource pour le professeur à télécharger :
Fichier Python

Diagramme de prédominance correspondant :



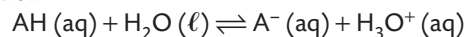
22 Côté maths

Résoudre une équation du second degré

1. La constante d'acidité K_A est :

$$K_A = \frac{[A^-]_{\text{éq}} \times [H_3O^+]_{\text{éq}}}{[AH]_{\text{éq}}}$$

2. L'équation :



montre que $[A^-]_{\text{éq}} = [H_3O^+]_{\text{éq}}$.

De plus, $C = [AH]_{\text{éq}} + [A^-]_{\text{éq}}$.

$$\text{Donc, } K_A = \frac{[H_3O^+]_{\text{éq}}^2}{C - [H_3O^+]_{\text{éq}}}$$

puis $[H_3O^+]_{\text{éq}}^2 + K_A \times [H_3O^+]_{\text{éq}} - K_A \times C = 0$;

soit $[H_3O^+]_{\text{éq}}^2 + 10^{-pK_A} \times [H_3O^+]_{\text{éq}} - 10^{-pK_A} \times C = 0$.

3. En posant $x = [H_3O^+]_{\text{éq}}$, on obtient l'équation du second degré : $x^2 + 10^{-4,2} \times x - 10^{-5,2} = 0$ avec $a = 1$, $b = 10^{-4,2}$ et $c = -10^{-5,2}$.

• Le discriminant est :

$$\Delta = (10^{-4,2})^2 - 4 \times (-10^{-5,2}) = 6,3135... \times 10^{-6} > 0.$$

• Les deux solutions sont : $x_{1,2} = \frac{-10^{-4,2} \pm \sqrt{\Delta}}{2}$.

On ne conserve que la solution positive :

$$x_1 = [H_3O^+]_{\text{éq}} = \frac{-10^{-4,2} + \sqrt{6,3135... \times 10^{-6}}}{2}$$

$$x_1 = 1,224... \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Et $pH = -\log [H_3O^+]_{\text{éq}}$

$$pH = -\log(1,224... \times 10^{-3}) = 2,9.$$

23 Indicateur coloré adapté à un titrage

1. Coordonnées du point équivalent E : ($V_E = 14,5 \text{ mL}$; $pH_E = 4,5$).

2. a. Un indicateur coloré acido-basique est un couple acide-base dont les espèces conjuguées teintes n'ont pas la même teinte.

b. L'indicateur coloré adapté à ce titrage doit contenir la valeur $pH_E = 4,5$ dans sa zone de virage. Seul le vert de bromocrésol satisfait à cette condition car sa zone de virage est $[3,8 - 5,4]$.

c. À l'équivalence de ce titrage, la couleur du mélange réactionnel passe du bleu au jaune.

3. Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu par ajout de petites quantités d'acide ou de base ou par dilution.

24 Python

Calcul informatisé d'un taux d'avancement final

1.

Ressource pour le professeur à télécharger :
Fichier Python

• Application à l'exercice 1 p. 162

pH de la solution ? pH = 3.1

Concentration en soluté apporté en mol/L ? C = 1e-2

Volume de la solution en L ? V = 0.200
tau = 0.08 L'acide est faible

• Application à l'exercice 7 p.164

pH de la solution ? pH = 2.3

Concentration en soluté apporté en mol/L ? C = 5e-3

Volume de la solution en L ? V = 0.150
tau = 1.0 L'acide est fort

2. a. Ressource pour le professeur à télécharger :
Fichier Python

```

1 pH=float(input('pH de la solution ? pH ='))
2 C=float(input('Concentration en soluté apporté en
mol/L ? C ='))
3 V=float(input('Volume de la solution en L ? V ='))
4 xf=10**(pH-14)
5 xmax=C*V
6 tau=round(xf/xmax,2)
7 if tau>1 : print('tau =', tau,'impossible')
8 else :
9     if tau==1 :
10        print('tau = ', tau, 'Acide faible')
11        print('nf(AH) = 0 mol')
12        print('nf(A-) = nf(H3O+) = ', xmax, 'mol')
    else :
        print('tau = ', tau, 'Acide faible')
        print('nf(AH)', xmax-xf, 'mol')
        print('nf(A-) = nf(H3O+) = ', xf, 'mol')
        if tau >= 0.90 and tau < 1 : print('Acide forte-
ment dissocié dans l'eau')
        if tau <= 0.10 : print('Acide faiblement
dissocié dans l'eau')

```

b. Exemple : Cas d'un acide faiblement dissocié dans l'eau :

pH de la solution ? pH = 3.8

Concentration en soluté apporté en mol/L ? C = 5e-3

Volume de la solution en L ? V = 0.150

```

tau = 0.03 Acide faible
nf(AH) = 0.0007262266021130833 mol
nf(A-) = nf(H3O+) = 2.3773397886916714e-05 mol
Acide faiblement dissocié dans l'eau

```

c. Application à l'exercice 19 p.166 avec pH = 1,9, C = 1,0 mol · L⁻¹ et V = 0,60 L :

```

tau = 0.01 Acide faible
nf(AH) = 0.5924464475292349 mol
nf(A-) = nf(H3O+) = 0.007553552470765005 mol
Acide faiblement dissocié dans l'eau

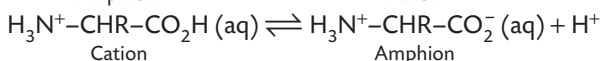
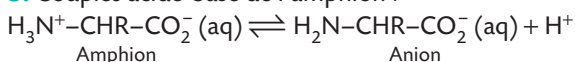
```

25 La leucine, un acide α-aminé

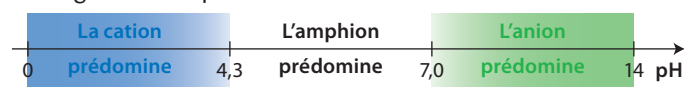
1. La leucine H₂N-CHR-CO₂H (avec R = -CH₂-(CH₃)₂) possède un groupe amine -NH₂ et un groupe carboxyle -CO₂H.

2. L'amphion formé a pour formule : H₃N⁺-CHR-CO₂⁻ (aq).

3. Couples acide-base de l'amphion :

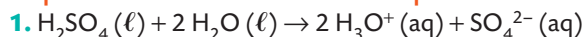


4. Diagramme de prédominance de la leucine :



26 Connaître les critères de réussite

pH d'une solution d'acide sulfurique



2. La stœchiométrie de l'équation de la réaction montre que :

$$\frac{n(\text{H}_2\text{SO}_4)}{1} = \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)}{2}$$

Or $n(\text{H}_2\text{SO}_4) = C \times V$ et $n(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+] \times V$

donc $\frac{C \times V}{1} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times V}{2}$ donc $C = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{2}$.

3. Par définition :

$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log(2 \times C) = -\log(2 \times 5,0 \times 10^{-3}) = 2,0$.

27 pH of a strong dibase

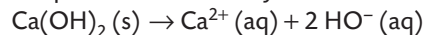
Traduction :

L'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ (s) est une dibase forte dans l'eau. Voyons comment calculer le pH d'une solution aqueuse homogène contenant 0,11 g d'hydroxyde de calcium, dans un volume total de 250 mL.

- Équilibrer l'équation de dissolution de l'hydroxyde de calcium dans l'eau.
- Calculer les quantités de l'espèce hydroxyde de calcium introduite dans l'eau.
- Combien de moles d'ions hydroxyde y a-t-il dans la solution ?
- Déduire la concentration en ions hydroxyde.
- Calculer le pH de la solution en utilisant $K_e = 1,0 \times 10^{-14}$.
- La solution S est diluée dix fois : quel est le pH de la solution diluée ?

Réponses :

1. Dissolution equation of calcium hydroxide in water :



2. Amount brought of calcium hydroxide :

$$n(\text{Ca}(\text{OH})_2) = \frac{m}{M} = \frac{0,11}{74,1} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

3. Moles of hydroxide ions in this solution : $\frac{n(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{1} = \frac{n(\text{HO}^-)}{2}$

$$n(\text{HO}^-) = 2n(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 3,0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

4. Concentration of hydroxide ions :

$$[\text{HO}^-] = \frac{n(\text{HO}^-)}{V} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$5. [\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_e}{[\text{HO}^-]} = \frac{1,0 \times 10^{-14}}{1,2 \times 10^{-2}} = 8,3 \times 10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = 12,1.$$

6. S solution is diluted 10 times so :

$$[\text{HO}^-] = \frac{1,2 \times 10^{-2}}{10} = 1,2 \times 10^{-3} \text{ mol ;}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_e}{[\text{HO}^-]} = \frac{1,0 \times 10^{-14}}{1,2 \times 10^{-3}} = 8,3 \times 10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log(8,3 \times 10^{-12}) = 11,1.$$

28 Résolution de problème

Comme un poisson dans l'eau...

1^{re} étape : S'approprier la consigne ou la question posée

- Quelle est la valeur de la concentration en dioxyde de carbone dissous de l'eau de l'aquarium ?
- Cette valeur permet-elle aux poissons de vivre dans de bonnes conditions ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. Le dioxyde de carbone est apporté dans l'aquarium sous forme gazeuse, le gaz se dissout alors dans l'eau pour former le dioxyde de carbone dissous.

2. Il existe un lien entre le pH de l'eau d'un aquarium et la concentration en masse en dioxyde de carbone dissous optimale pour les poissons.

3^e étape : Dégager la problématique

Déterminer la concentration en dioxyde de carbone dissous de l'eau d'un aquarium et son pH puis utiliser le tableau du doc. **A** pour répondre à la question posée.

4^e étape : Construire la réponse

- Déterminer le pH de l'eau de l'aquarium
- Calculer la concentration en ions hydrogénéocarbonate HCO_3^- de l'eau de l'aquarium notée $[\text{HCO}_3^-]_{\text{aquarium}}$ en utilisant le titrage.
- En déduire la concentration en dioxyde de carbone dissous.
- Rechercher où se situent les valeurs de pH et de la concentration dans le tableau du doc. **A**.
- Conclure.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

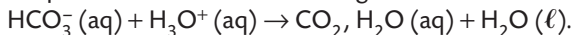
- Présenter le contexte et introduire la problématique.

Pour savoir si la concentration en dioxyde de carbone dissous de l'eau d'un aquarium est correcte, il faut déterminer la valeur du pH de cette eau ainsi que la valeur de la concentration. On dispose, pour cela, du titrage acido-basique de l'eau de cet aquarium.

- Mettre en forme la réponse.

Le pH de l'eau de l'aquarium est lu sur le graphe pour $V_A = 0$ mL : pH = 7,4.

L'équation de la réaction de titrage est :



À l'équivalence du titrage, on réalise un mélange stœchiométrique des réactifs titrants et titrés, soit :

$$\frac{n(\text{HCO}_3^-)_{\text{titrée}}}{1} = \frac{n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{versée}}}{1};$$

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{aquarium}} \times V_{\text{titré}} = C_A \times V_E;$$

$$\text{d'où } [\text{HCO}_3^-]_{\text{aquarium}} = \frac{C_A \times V_E}{V_{\text{titré}}}.$$

Graphiquement, $V_E = 7,2$ mL donc :

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{aquarium}} = \frac{5,0 \times 10^{-2} \times 7,2}{100,0} = 3,6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{Or } \text{pH} = \text{p}K_A + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} \right);$$

$$\text{donc } \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} \right) = \text{pH} - \text{p}K_A;$$

$$\text{soit } \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} = 10^{\text{pH} - \text{p}K_A}$$

$$\text{d'où } [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}} = \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{10^{\text{pH} - \text{p}K_A}}.$$

On admet que $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}] = [\text{CO}_2 \text{ dissous}]$ donc la concentration en masse en CO_2 dissous est alors :

$$\begin{aligned} t(\text{CO}_2 \text{ dissous}) &= [\text{CO}_2 \text{ dissous}] \times M(\text{CO}_2) \\ &= \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \times M(\text{CO}_2)}{10^{\text{pH} - \text{p}K_A}} \\ &= \frac{3,6 \times 10^{-3} \times 44,0}{10^{7,2 - 6,4}} \\ &= 1,6 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} = 16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}. \end{aligned}$$

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

D'après le tableau du doc. **B**, pour pH = 7,4, la concentration en masse en CO_2 est optimale pour les plantes et les poissons.

| pH | Concentration en masse en CO_2 dissous ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | | | | | | | | | |
|-----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 7,8 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 7,6 | 1 | 2 | 4 | 5 | 7 | 8 | 10 | 11 | 13 | 14 |
| 7,4 | 1 | 4 | 6 | 8 | 11 | 13 | 16 | 18 | 20 | 23 |
| 7,2 | 2 | 6 | 9 | 13 | 17 | 21 | 25 | 28 | 32 | 36 |
| 7,0 | 3 | 9 | 15 | 21 | 27 | 33 | 39 | 45 | 51 | 57 |
| 6,8 | 5 | 14 | 24 | 33 | 43 | 52 | 62 | 72 | 81 | 91 |

D'après <http://www.aquabase.org>

29 Le tampon TRIS

$$1. \text{pH} = \text{p}K_A + \log \left(\frac{[\text{RNH}_2]_{\text{éq}}}{[\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}}} \right).$$

2. La relation précédente donne :

$$\log \left(\frac{[\text{RNH}_2]_{\text{éq}}}{[\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}}} \right) = \text{pH} - \text{p}K_A \text{ soit } \frac{[\text{RNH}_2]_{\text{éq}}}{[\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}}} = 10^{\text{pH} - \text{p}K_A}.$$

On a aussi : $C = [\text{RNH}_2]_{\text{éq}} + [\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}}$.

$$\text{Soit } C = 10^{\text{pH} - \text{p}K_A} \times [\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}} + [\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}}$$

$$= (1 + 10^{\text{pH} - \text{p}K_A}) \times [\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}}.$$

Finalement :

$$[\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}} = \frac{C}{(1 + 10^{\text{pH} - \text{p}K_A})} = \frac{0,10}{(1 + 10^{7,4 - 8,1})} = 8,3 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Et $[\text{RNH}_2]_{\text{éq}} = C - [\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}} = 1,7 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. a. $\text{RNH}_2 (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) \rightarrow \text{RNH}_3^+ (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell)$

b. Tableau d'avancement :

| Équation | $\text{RNH}_2 (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) \rightarrow \text{RNH}_3^+ (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell)$ | | | |
|-----------------------------|--|------------------------|---|---------|
| État initial ($x = 0$ mol) | $n_1 = [\text{RNH}_2]_{\text{éq}} \times V_S$ | n_2 | $n_3 = [\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}} \times V_S$ | Solvant |
| État en cours (x) | $n_1 - x$ | $n_2 - x$ | $n_3 + x$ | Solvant |
| État final (x_f) | $n_1 - x_{\text{max}}$ | $n_2 - x_{\text{max}}$ | $n_3 + x_{\text{max}}$ | Solvant |

Avec :

$$n_1 = [\text{RNH}_2]_{\text{éq}} \times V_S = 1,7 \times 10^{-2} \times 1,00$$

$$n_1 = 1,7 \times 10^{-2} \text{ mol} = 17 \text{ mmol};$$

$$n_2 = 10 \text{ mmol};$$

$$n_3 = [\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}} \times V_S = 8,3 \times 10^{-2} \times 1,00$$

$$n_3 = 8,3 \times 10^{-2} \text{ mol} = 83 \text{ mmol}.$$

Comme $\frac{n_1}{1} > \frac{n_2}{1}$ alors $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$ est limitant. Par conséquent, dans l'état final : $n_2 - x_{\text{max}} = 0$, donc $x_{\text{max}} = n_2 = 10$ mmol.

$$\text{On a donc, } [\text{RNH}_2]_f = \frac{n_1 - x_{\text{max}}}{V_S} = \frac{(17 - 10)}{1,00} = 7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{et } [\text{RNH}_3^+]_f = \frac{n_3 + x_{\text{max}}}{V_S} = \frac{(83 + 10)}{1,00} = 93 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{D'où : } \text{pH} = \text{p}K_A + \log \left(\frac{[\text{RNH}_2]_f}{[\text{RNH}_3^+]_f} \right) = 8,1 + \log \left(\frac{7}{93} \right) = 7,0.$$

Le pH a varié de seulement 0,4 unité pH.

c. Dans l'eau pure :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_f = \frac{n}{V_S} = \frac{10 \times 10^{-3}}{1,00} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (1,0 \times 10^{-2}) = 2,0.$$

Le pH aurait beaucoup diminué passant de 7,0 à 2,0.

4. Le tampon TRIS, pour cette réaction enzymatique, permet de maintenir un pH quasi-constant dans la solution S.

5. a. $\text{pH} = \text{p}K_A + \log\left(\frac{[\text{RNH}_2]_{\text{éq}}}{[\text{RNH}_3^+]_{\text{éq}}}\right) = \text{p}K_A = 7,4.$

b. Le pH initial est : $\text{pH}_i = 7,4.$

Les ions H_3O^+ (aq) étant limitants, on a : $n = x_{\text{max}}$.

Le pH final est :

$$\text{pH}_f = \text{p}K_A + \log\left(\frac{[\text{RNH}_2]_f}{[\text{RNH}_3^+]_f}\right) = \text{p}K_A + \log\left(\frac{\frac{n_1 - n}{V}}{\frac{n_3 + n}{V}}\right)$$

$$\text{pH}_f = \text{p}K_A + \log\left(\frac{\frac{c \times V - n}{V}}{\frac{c \times V + n}{V}}\right) = \text{p}K_A + \log\left(\frac{c - \frac{n}{V}}{c + \frac{n}{V}}\right)$$

La variation de pH est donc : $\Delta\text{pH} = \text{pH}_f - \text{pH}_i = \log\left(\frac{c - \frac{n}{V}}{c + \frac{n}{V}}\right).$

c. Calcul de ΔpH pour les deux tampons TRIS :

| Tampon TRIS 1 | Tampon TRIS 2 |
|--|--|
| $c_1 = 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | $c_2 = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ |
| $\Delta\text{pH} = 0,82$ | $\Delta\text{pH} = 0,67$ |

La meilleure solution tampon est celle pour laquelle la variation de pH est la plus petite ; c'est donc le tampon TRIS 2.

30 Acidification des océans

1. La pression partielle $P_{\text{CO}_2^{\text{océan}}}$ (courbe bleu) augmente, la concentration $[\text{CO}_2^{\text{océan}}]$, proportionnelle à $P_{\text{CO}_2^{\text{océan}}}$ augmente donc aussi.

En revanche, le pH de l'océan (courbe verte) diminue.

2. Graphiquement, $\text{p}K_{A1}$ est l'abscisse du point intersection entre les courbes rouge et verte donc $\text{p}K_{A1} = 6,3.$

Le doc. A indique $K_{A1} = 5,01 \times 10^{-7} ;$

soit $K_{A1} = -\log(5,01 \times 10^{-7}) = 6,3.$

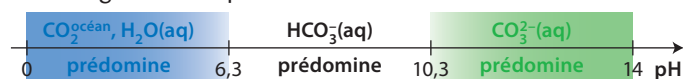
Graphiquement, $\text{p}K_{A2}$ est l'abscisse du point intersection entre les courbes verte et bleue donc $\text{p}K_{A2} = 10,3.$

Le doc. A indique $K_{A2} = 5,01 \times 10^{-11} ;$

soit $K_{A2} = -\log(5,01 \times 10^{-11}) = 10,3.$

Les valeurs obtenues graphiquement sont en accord avec les valeurs issues du doc. A.

3. a. Diagramme de prédominance :



b. Dans l'océan, le pH est compris entre 8,05 et 8,10 : l'espèce qui prédomine dans l'océan est HCO_3^- (aq).

4. En présence d'un excès de dioxyde de carbone, le carbonate de calcium se dissout. L'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dissous a pour conséquence la dissolution des coquilles des organismes marins, et donc leur amincissement voire leur disparition.

Vers le Bac

p. 170

Préparation à l'écrit

31 Une astuce culinaire

1. Comme $\text{pH} > \text{p}K_{A2}$, l'espèce prédominante dans la solution est $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ (aq).

Diagramme de prédominance :



2. Le tableau d'avancement de la réaction entre la triméthylamine et l'eau s'écrit :

| Équation | $(\text{CH}_3)_3\text{N}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons (\text{CH}_3)_3\text{NH}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$ | | | |
|--------------------------------------|---|---------|-------|-------|
| État initial ($x = 0 \text{ mol}$) | $n = C \times V$ | Solvant | 0 | 0 |
| État en cours (x) | $n - x$ | Solvant | x | x |
| État final (x_f) | $n - x_f$ | Solvant | x_f | x_f |

L'avancement final x_f est :

$$x_f = n_{\text{éq}}(\text{HO}^-) = [\text{HO}^-]_{\text{éq}} \times V$$

$$x_f = \frac{K_e \times V}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}} = \frac{K_e \times V}{10^{-\text{pH}}} = \frac{1,0 \times 10^{-14} \times 50 \times 10^{-3}}{10^{-10,9}}$$

$$x_f = 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

$$\text{Et } n = C \times V = 1,0 \times 10^{-2} \times 50 \times 10^{-3} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ mol.}$$

La composition finale de la solution est :

$$n_{\text{éq}}((\text{CH}_3)_3\text{N}) = n - x_f = 5,0 \times 10^{-4} - 4,0 \times 10^{-5} = 4,6 \times 10^{-4} \text{ mol ;}$$

$$n_{\text{éq}}((\text{CH}_3)_3\text{NH}^+) = n_{\text{éq}}(\text{HO}^-) = x_f = 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol.}$$

3. La triméthylamine n'est pas entièrement consommée à la fin de la réaction, la réaction n'est donc pas totale, la triméthylamine est une base faible dans l'eau.

4. À concentrations apportées égales, la triméthylamine $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ (aq) est une base plus forte dans l'eau que les ions éthanoate CH_3CO_2^- (aq) car $\text{p}K_{A2} > \text{p}K_{A1}.$

5. L'indicateur coloré adapté à ce titrage doit contenir le pH équivalent pH_E dans sa zone de virage. Graphiquement, $\text{pH}_E = 8,6.$ Donc seule, la phénolphtaléine conviendrait pour ce titrage car sa zone de virage est $[8,0 - 10,0].$

6. $\text{pH} = \text{p}K_A + \log\left(\frac{[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]_{\text{éq}}}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]_{\text{éq}}}\right).$

7. a. Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu par ajout de petites quantités d'acide ou de base ou par dilution.

b. À la demi-équivalence du titrage, $\text{pH} = 4,8 = \text{p}K_A.$ Le mélange réactionnel contient de l'acide éthanoïque et des ions éthanoate en concentrations égales. L'ajout d'hydroxyde de sodium fait peu varier le pH de la solution. On a donc réalisé une solution tampon à la demi-équivalence du titrage.

8. $K_{A2} = \frac{[(\text{CH}_3)_3\text{N}]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+]_{\text{éq}}}$

donc : $\frac{[(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+]_{\text{éq}}}{[(\text{CH}_3)_3\text{N}]_{\text{éq}}} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{K_{A2}} = \frac{10^{-\text{pH}}}{10^{-\text{p}K_{A2}}} = 10^{\text{p}K_{A2} - \text{pH}}$

9. $\frac{[(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+]_{\text{éq}}}{[(\text{CH}_3)_3\text{N}]_{\text{éq}}} = 10^{9,8 - 6,5} = 10^{3,3} \approx 2,0 \times 10^3.$

10. Quand on ajoute du vinaigre, alors :

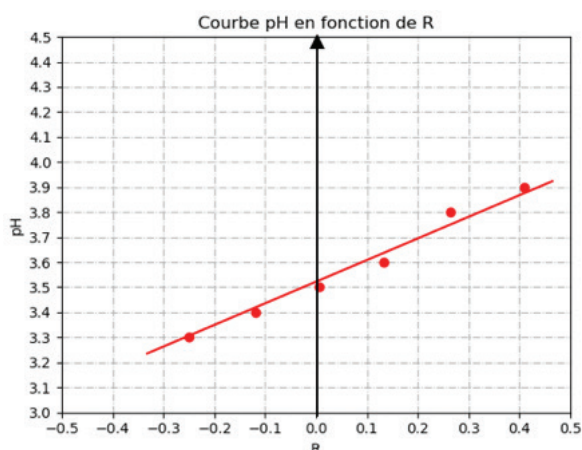
$$[(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+]_{\text{éq}} = 2,0 \times 10^3 \times [(\text{CH}_3)_3\text{N}]_{\text{éq}}.$$

L'espèce d'odeur nauséabonde $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ est alors très minoritaire dans l'eau de cuisson.

Préparation à l'ECE

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 from numpy import log10, arange
3 Vb = [0.010, 0.012, 0.014, 0.016, 0.018, 0.020]
4 pH = [3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 3.9]
5 R=[]
6 for i in Vb :
7     R.append(log10(0.1*i/(0.5/180-0.1*i)))
8 plt.title('Courbe pH en fonction de R')
9 plt.xlabel('R')
10 plt.ylabel('pH')
11 plt.axis(xmin=-0.5,xmax=0.5,ymin=3,ymax=4.5)
12 plt.xticks(arange(-0.5,0.6,0.1))
13 plt.yticks(arange(3,4.6,0.1))
14 plt.grid(linestyle="-.")
15 plt.plot(R, pH, 'ro')
16 plt.show()
    
```



2. Comme $\text{pH} = \text{p}K_A + R$, on a $\text{pH} = \text{p}K_A$ lorsque $R = 0$.
Le graphe coupe l'axe des ordonnées en un point dont l'ordonnée vaut $\text{p}K_A$. Graphiquement, $\text{p}K_A \approx 3,5$

Sujet complet fourni dans la version numérique :

Matériel mis à disposition :

- Un pH-mètre étalonné et du papier Joseph.
- Un ordinateur avec un logiciel tableur-grapheur.
- Un comprimé d'Aspirine du Rhône® 500 mg.
- Eau distillée.
- Un mortier et un pilon.
- Une spatule.
- Une fiole jaugée de 200,0 mL.
- Un entonnoir.
- Un agitateur magnétique et un barreau aimanté.
- Une burette graduée de 25,0 mL.
- Bêchers de 250 mL.
- Un bécher de 100 mL.
- Un flacon contenant 50 mL d'une solution titrée de concentration en hydroxyde de sodium (soude) $C_b = 0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Une paire de lunettes.
- Une paire de gants.

Vers l'oral

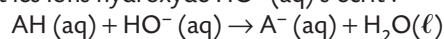
À deux, c'est mieux

Évaluation orale n° 1

Le pH d'une solution aqueuse de concentration C en acide benzoïque est supérieur à $-\log C$, l'acide benzoïque est donc un acide faible.

Complément scientifique

L'équation de la réaction entre l'acide acétylsalicylique, noté AH (aq), et les ions hydroxyde HO^- (aq) s'écrit :



Le pH du mélange est : $\text{pH} = \text{p}K_A + R$ avec $R = \log \left(\frac{c_b \times V_b}{\frac{m}{M} - c_b \times V_b} \right)$.

Donnée

Masse molaire de l'acide acétylsalicylique : $M = 180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

1. **ANA-RAIS** Rédiger le protocole expérimental permettant de préparer 200,0 mL d'une solution aqueuse d'acide acétylsalicylique par dissolution d'un comprimé d'aspirine dans le volume nécessaire d'eau distillée.

Protocole expérimental :

- Préparer 200,0 mL d'une solution aqueuse d'acide acétylsalicylique par dissolution d'un comprimé d'aspirine dans le volume nécessaire d'eau distillée.
- Ajouter à la solution précédente, à l'aide d'une burette graduée, $V_b = 10,0 \text{ mL}$ de solution S_b de concentration $C_b = 0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en hydroxyde de sodium. Mesurer le pH de la solution.
- Poursuivre les ajouts de la solution S_b de 2,0 mL en 2,0 mL et mesurer le pH à chaque ajout. Les valeurs du pH et du volume V_b sont entrées dans le tableau ci-dessous :

| $V_b(\text{L})$ | pH |
|-----------------------|----|
| $10,0 \times 10^{-3}$ | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

A Programme Python

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 from numpy import log10, arange
3 Vb = [0.010, 0.012, 0.014, 0.016, 0.018, 0.020]
4 pH = [3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 4.0, 4.1]
5 R=[]
6 for i in Vb :
7     R.append(log10(0.1*i/(0.5/180-0.1*i)))
8 plt.title('Courbe pH en fonction de R')
9 plt.xlabel('R')
10 plt.ylabel('pH')
11 plt.axis(xmin=-0.5, xmax=0.5, ymin=3, ymax=4.5)
12 plt.xticks(arange(-0.5,0.6,0.1))
13 plt.yticks(arange(3,4.6,0.1))
14 plt.grid(linestyle="-.")
15 plt.plot(R, pH, 'ro')
16 plt.show()
    
```

2. **RÉA** Compléter et utiliser le programme Python fourni pour tracer le graphique $\text{pH} = f(R)$.
3. **VAL** En expliquant la méthode utilisée, déduire du graphe la valeur du $\text{p}K_A$ du couple de l'acide acétylsalicylique

p. 172

Évaluation orale n° 2

Le pH d'une solution aqueuse de concentration C en acide bromhydrique est égal à $-\log C$, l'acide bromhydrique est donc un acide fort.

Les forces des acides et des bases

- **La constante d'acidité a-t-elle une unité ?**

La constante d'acidité n'a pas d'unité comme le montre son expression faisant intervenir la concentration standard c° .

- **Pourquoi l'autoprotolyse de l'eau peut-elle être considérée comme une réaction acide-base ?**

L'eau est une espèce chimique qui appartient à deux couples acide-base : $\text{H}_2\text{O}(\ell) / \text{HO}^-(\text{aq})$ et $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) / \text{H}_2\text{O}(\ell)$. Il peut donc se produire une réaction acide-base entre l'acide $\text{H}_2\text{O}(\ell)$ du premier couple et la base $\text{H}_2\text{O}(\ell)$ du deuxième couple, or cette réaction est appelée autoprotolyse de l'eau. L'autoprotolyse de l'eau est donc une réaction acide-base.

- **À quelle condition un indicateur coloré est-il adapté à un titrage ?**

Un indicateur coloré est adapté à un titrage si sa zone de virage contient le pH à l'équivalence pH_E .

- **Une solution dans laquelle l'espèce basique d'un couple est prédominante a-t-elle un pH supérieur à 7 ?**

Il n'y a pas de lien entre la nature de l'espèce prédominante d'un couple acide-base dans une solution et le pH de cette solution. On peut seulement dire que si l'espèce prédominante dans la solution est l'espèce basique, le pH de la solution est supérieur au $\text{p}K_A$ du couple.

9

Forcer l'évolution d'un système

Programme officiel

Constitution et transformations de la matière

| 3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique | |
|---|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| C) Forcer le sens d'évolution d'un système | |
| Passage forcé d'un courant pour réaliser une transformation chimique. Constitution et fonctionnement d'un électrolyseur. Stockage et conversion d'énergie chimique. | Modéliser et schématiser, à partir de résultats expérimentaux, les transferts d'électrons aux électrodes par des réactions électrochimiques. Déterminer les variations de quantité de matière à partir de la durée de l'électrolyse et de la valeur de l'intensité du courant. <i>Identifier les produits formés lors du passage forcé d'un courant dans un électrolyseur. Relier la durée, l'intensité du courant et les quantités de matière de produits formés.</i> Citer des exemples de dispositifs mettant en jeu des conversions et stockages d'énergie chimique (piles, accumulateurs, organismes chlorophylliens) et les enjeux sociétaux associés. |

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

| | Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|-----------------|---|---|--|
| SECONDE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Transformation chimique, réaction chimique, équation. Espèce spectatrice, stœchiométrie, réactif limitant. Caractère endothermique ou exothermique d'une transformation. | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – la quantité de matière d'une espèce ; – la valeur d'une concentration en masse. Établir l'équation de réaction associée et l'ajuster. | $\rho = \frac{m}{V}$ $t = \frac{m}{V}$ Équation chimique. |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> Entités chimiques : molécules, atomes, ions. Nombre d'entités. | Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – la masse d'une entité à partir de sa formule brute et de la masse des atomes qui la composent ; – le nombre d'entités et la quantité de matière (en mol) d'une espèce dans une masse d'échantillon. | $N = \frac{m}{m_{\text{entité}}}$ $n = \frac{N}{N_A}$ |
| PREMIÈRE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Espèce chimique. Évolution des quantités de matière lors d'une transformation. Oxydant, réducteur, oxydo-réduction. Intensité, porteur de charge électrique, charge, débit de charges. | <ul style="list-style-type: none"> Identifier un oxydant, un réducteur. Écrire un couple oxydant/réducteur. Établir une équation de la réaction entre un oxydant et un réducteur. Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – le réactif limitant ; – la composition d'un système dans l'état final. Relier intensité d'un courant continu et débit de charges. | $n = \frac{m}{M} ; n = \frac{V}{V_m} ;$ $C = \frac{n}{V}$ Équation d'oxydo-réduction, demi-équation électronique. $Q = I \times \Delta t$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> Entités chimiques : molécules, atomes, ions. Transfert d'électrons. | Identifier le transfert d'électrons entre deux réactifs. | |

| TERMINALE | | | |
|---------------|---|--|--|
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Critère d'évolution spontanée, transformation spontanée. • Quotient de réaction, constante d'équilibre. • Oxydant, réducteur, oxydo-réduction. • Passage forcé d'un courant. • Électrolyseur. • Transformation modélisée par des transferts d'ion hydrogène H⁺. • Stockage et conversion d'énergie chimique. | <ul style="list-style-type: none"> • Comprendre le fonctionnement d'une pile. • Déterminer les variations de quantité de matière à partir de la durée de l'électrolyse et de la valeur de l'intensité du courant. • Relier la durée, l'intensité du courant et les quantités de matière de produits formés. | <ul style="list-style-type: none"> • Modèle de l'équilibre dynamique. • Réaction, équation d'oxydoréduction. • Réactions électrochimiques aux électrodes. |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Entités chimiques : molécules, atomes, ions. • Mécanisme réactionnel : acte élémentaire, intermédiaire réactionnel. • Transferts d'ion hydrogène H⁺. | <ul style="list-style-type: none"> • Identifier un transfert d'électrons aux électrodes. • Identifier un transfert d'ion hydrogène. | Chocs entre entités, acte élémentaire. |

Activité 1

expérimentale Forcer l'évolution d'un système

p. 174

Capacités exigibles

- Modéliser et schématiser, à partir de résultats expérimentaux, les transferts d'électrons aux électrodes par des réactions électrochimiques.
- Déterminer les variations de quantité de matière à partir de la durée de l'électrolyse et de la valeur de l'intensité du courant.
- Identifier les produits formés lors du passage forcé du courant dans un électrolyseur.

Matériel :

- Tube à essais.
- Tube en U.
- Balance au centième de gramme.
- Générateur de tension continue réglable.
- Pincès crocodiles.
- Ampèremètre.
- Fils de connexion.
- Chronomètre.

Consommables :

- Clou en fer.
- Plaque en fer.
- Solution de sulfate de zinc de concentration 1 mol · L⁻¹.
- Acide sulfurique concentré.

Pratique expérimentale

1 a. Manipulation.

b. Aucune transformation chimique ne semble avoir lieu.

2 a. $Q_{r,i} = \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{Zn}^{2+}]} = 0$.

b. $Q_{r,i} < K$.

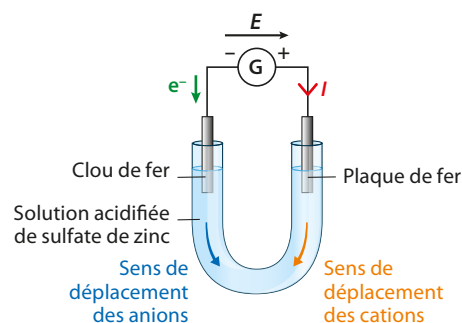
c. $K = \frac{[\text{Fe}^{2+}]_{\text{éq}}}{[\text{Zn}^{2+}]_{\text{éq}}} = \frac{[\text{Fe}^{2+}]_{\text{éq}}}{1}$

donc $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{éq}} = 1,5 \times 10^{-11} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Cette valeur est très faible, la réaction est donc peu avancée.

3 Manipulation.

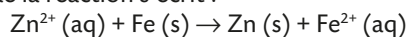
4



5 Anode : $\text{Fe (s)} \rightarrow \text{Fe}^{2+} \text{ (aq)} + 2 \text{ e}^-$

Cathode : $\text{Zn}^{2+} \text{ (aq)} + 2 \text{ e}^- \rightarrow \text{Zn (s)}$ (on observe bien un dépôt de zinc sur le clou)

L'équation de la réaction s'écrit :



6 $Q = I \times \Delta t = n(e^-) \times F$

$$n(e^-) = 2 \times n(\text{Zn}).$$

$$m(\text{Zn}) = \frac{I \times \Delta t \times M(\text{Zn})}{2 \times F}$$

$$m(\text{Zn}) = \frac{0,2 \text{ A} \times (20 \times 60) \text{ s} \times 65,4 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{2 \times 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}}$$

$$m(\text{Zn}) = 0,08 \text{ g}.$$

7 La masse obtenue expérimentalement est plus faible. En effet, aux électrodes on observe des dégagements gazeux, signes que d'autres réactions ont lieu (réduction de l'eau en dihydrogène à la cathode et oxydation de l'eau en dioxygène à l'anode).

Un pas vers le cours

8 Il est possible de forcer l'évolution d'un système grâce à un apport d'énergie fournie par un générateur.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Dans les dispositifs habituels, une plaque de zinc est placée à l'anode de façon à ce que la concentration en ions zinc (II) de la solution reste constante. Ici, nous avons choisi de placer à l'anode une plaque de fer afin que l'équation de la réaction corresponde à celle écrite dans les données.

Il a été choisi d'effectuer la transformation dans un tube en U afin de limiter la diffusion des ions fer (II) formés à l'anode vers la cathode. Ils pourraient alors s'y réduire. Néanmoins, la concentration en ions fer (II) restant faible, cela est peu probable et la transformation peut donc être réalisée dans un bécher. Cela permet

d'augmenter la surface de la plaque de fer et donc de diminuer la tension aux bornes du générateur.

Un montage qui utiliserait un pont salin est inenvisageable du fait de la grande résistance de celui-ci.

Activité 2

documentaire Les voitures « à hydrogène »

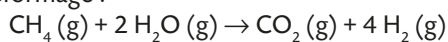
p. 175

Capacité exigible

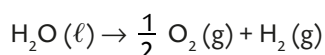
- Citer des exemples de dispositifs mettant en jeu des conversions et stockages d'énergie chimique (piles, accumulateurs, organismes chlorophylliens) et les enjeux sociétaux associés.

Analyse des documents

1 Vaporeformage :



Électrolyse de l'eau :



2 a. Dans le circuit extérieur et les électrodes, ce sont les électrons qui assurent le passage du courant. Dans l'électrolyseur, ce sont les ions.

b. Le générateur fournit de l'énergie au système, il force la transformation de l'eau en dioxygène et dihydrogène.

c. L'énergie solaire est transformée, grâce aux panneaux photovoltaïques, en énergie électrique, elle-même transformée en énergie chimique grâce à l'électrolyseur.

3 La biomasse peut être utilisée pour produire du dihydrogène selon deux voies. La première consiste à produire du biogaz par fermentation de la biomasse en l'absence d'oxygène. Le biogaz est un gaz composé essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone. Il peut être ensuite vaporeformé pour produire du dihydrogène.

La seconde voie est la gazéification de la biomasse qui consiste à décomposer par la chaleur la biomasse en présence d'un réactif gazeux (dioxyde de carbone, vapeur d'eau puis dioxygène de l'air). La réaction de gazéification se passe dans des conditions de température très élevées (plus de 1 000 °C). Le gaz de synthèse obtenu à la fin, appelé « syngas » (pour « synthetic gas »), est un mélange de deux gaz : le monoxyde de carbone et l'hydrogène.

Un pas vers le cours

4 L'utilisation du dihydrogène peut sembler une alternative à la combustion des énergies fossiles. Cependant, il reste le problème de sa production. Si le dihydrogène est fabriqué à partir de combustibles fossiles, cela produit également beaucoup de dioxyde de

carbone. En revanche, s'il est produit à partir de la biomasse ou de l'eau de mer, le bilan carbone de sa production est beaucoup plus positif. Reste cependant, pour le moment, le problème de son coût élevé. C'est le véritable frein à la démocratisation du véhicule à hydrogène, environ deux fois supérieur à celui d'un véhicule à batterie.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Le choix de cette activité a été dicté par la partie du programme liée aux enjeux sociétaux associés aux dispositifs mettant en jeu des conversions et stockages d'énergie chimique.

Avec une population mondiale qui pourrait atteindre neuf milliards d'habitants en 2050, la demande en transports ne va pas cesser de croître, d'autant plus si cette population est issue des pays en développement. L'Europe cherche comment réduire les émissions de dioxyde de carbone. Les voitures à hydrogène actuellement fabriquées, avec une autonomie de plusieurs centaines de kilomètres pour un plein, peuvent être une solution.

L'idée pédagogique que nous avons souhaité développer se situe dans l'argumentation qu'un tel sujet peut initier. Le débat mouvant ou jeu de positionnement peut s'avérer être une pratique d'animation intéressante incitant à la participation des élèves dans ce genre de situation. Le professeur peut présenter la situation de façon volontairement polémique. Les élèves effectuent des recherches complémentaires sur le sujet (en plus des arguments développés dans l'activité). Chaque élève doit se positionner physiquement dans la salle (ceux plutôt en accord d'un côté et ceux plutôt en désaccord de l'autre). Au fur et à mesure que chacun émet un argument, étayé, vérifié, chacun se déplace (personne n'a le droit de rester au milieu). Le fait de se déplacer réellement pousse à choisir un camp et des arguments. C'est un ping-pong qui doit s'installer. Le professeur peut élargir le débat au-delà de la seule question de la voiture à hydrogène (la voiture électrique peut être aussi un excellent sujet ou, de manière encore plus large, la réduction des gaz à effet de serre). L'idée est de préparer les élèves à l'oral plus que de répondre « pour » ou « contre », ce qui n'a pas tellement de sens eu égard les enjeux. Faire comprendre les élèves qu'une approche systémique est nécessaire est un élément fondamental pour en faire des citoyens à part entière.

Capsule vidéo de cours : Électrolyse

QCM

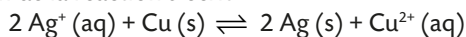
p. 179

1. A ; 2. C ; 3. B et C ; 4. A et C ; 5. A ; 6. B ; 7. A et C ; 8. A ; 9. A ; 10. A et C ; 11. A, B et C.

3 Reconnaître la nature d'une transformation

• Système 1 : à l'état initial, on mélange des ions argent Ag^+ (aq) et du cuivre métallique Cu (s).

L'équation de la réaction s'écrit :



La constante d'équilibre est égale à $K_1 = 2,2 \times 10^{15}$.

Le quotient de réaction à l'état initial s'écrit :

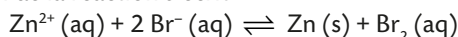
$$Q_{r,i} = \frac{[\text{Cu}^{2+}] \times c^\circ}{[\text{Ag}^+]^2} = 0.$$

$Q_{r,i} < K_1$ donc la transformation évolue dans le sens direct de l'équation.

$K \geq 10^3$, la réaction est totale. Il est donc inutile de forcer le système avec une électrolyse.

• Système 2 : à l'état initial, on mélange des ions bromure Br^- (aq) et des ions zinc (II) Zn^{2+} (aq).

L'équation de la réaction s'écrit :



La constante d'équilibre est égale à $K_2 = 2,5 \times 10^{-62}$. Le quotient de réaction à l'état initial s'écrit :

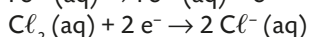
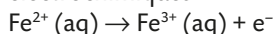
$$Q_{r,i} = \frac{[\text{Br}_2] \times (c^\circ)^2}{[\text{Br}^-]^2 \times [\text{Zn}^{2+}]} = 0.$$

$Q_{r,i} < K$ donc la transformation évolue dans le sens direct de l'équation.

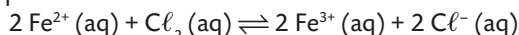
$K \geq 10^3$ donc la réaction est limitée, l'avancement sera faible. Pour obtenir une quantité notable de produits, il est nécessaire de forcer le système en réalisant une électrolyse.

4 Justifier une transformation forcée

1. D'après les observations, les ions fer (II) Fe^{2+} (aq) s'oxydent en ions fer (III) Fe^{3+} (aq) et le dichlore Cl_2 (aq) se réduit en ions chlorure Cl^- (aq). On peut donc écrire les équations des réactions électrochimiques :



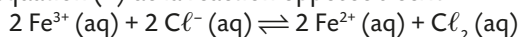
Soit l'équation :



La constante d'équilibre K_1 est égale à :

$$K_1 = \frac{[\text{Fe}^{3+}]_{\text{éq}}^2 \times [\text{Cl}^-]_{\text{éq}}^2}{[\text{Fe}^{2+}]_{\text{éq}}^2 \times [\text{Cl}_2]_{\text{éq}} \times c^\circ} = 1,0 \times 10^{21}.$$

2.a. L'équation (2) de la réaction opposée s'écrit :



La constante d'équilibre K_2 s'exprime par :

$$K_2 = \frac{[\text{Fe}^{2+}]_{\text{éq}}^2 \times [\text{Cl}_2]_{\text{éq}} \times c^\circ}{[\text{Fe}^{3+}]_{\text{éq}}^2 \times [\text{Cl}^-]_{\text{éq}}^2} = \frac{1}{K_1} = 1,0 \times 10^{-21}.$$

b. $Q_{r,i} = \frac{[\text{Fe}^{2+}]^2 \times [\text{Cl}_2] \times c^\circ}{[\text{Fe}^{3+}]^2 \times [\text{Cl}^-]^2} = 0.$

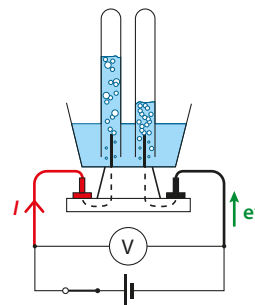
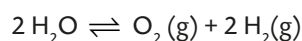
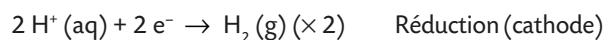
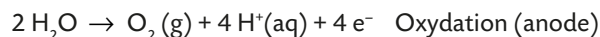
$Q_{r,i} < K_2$ donc la transformation évolue dans le sens direct de l'équation (2).

c. $K_2 < 10^3$ donc la réaction est limitée, l'avancement sera faible.

d. Pour obtenir une quantité notable de produits Fe^{2+} (aq) et Cl_2 (aq), il est nécessaire de forcer le système en réalisant une électrolyse.

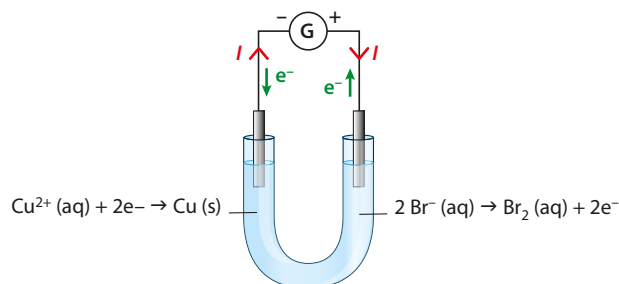
5 Identifier la réaction électrochimique

1. Les électrons circulent de la borne - du générateur vers la borne + du générateur.
2. Les électrons arrivent sur l'électrode reliée à la borne - du générateur. Une espèce se réduit, cette électrode joue le rôle de cathode. Des électrons partent de l'électrode reliée à la borne + du générateur, une oxydation s'est donc produite, cette électrode joue le rôle d'anode.
3. On écrit les demi-équations redox :



4. D'après la stœchiométrie de l'équation de la réaction, il se forme deux fois plus de dihydrogène H_2 (g) que de dioxygène O_2 (g). Ce résultat est cohérent avec le schéma où l'on observe un volume dégagé deux fois plus grand à la cathode.

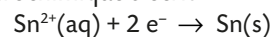
6 Compléter un dispositif d'électrolyse



- L'électrode de gauche est siège d'une réduction. Des électrons doivent donc arriver sur cette électrode qui doit donc être reliée à la borne - du générateur.
- L'électrode de droite est le siège d'une oxydation. Des électrons partent de cette électrode qui doit donc être reliée à la borne + du générateur.
- Le sens de circulation des électrons est ainsi déterminé, le sens conventionnel du courant est inverse.

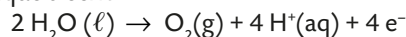
7 Déterminer une quantité de matière

1. L'équation électrochimique s'écrit :



Il s'agit d'une réduction, l'électrode est donc une cathode.

2. Le gaz qui se dégage est le dioxygène O_2 (g). En effet, du dioxygène gazeux ravive la flamme d'une allumette. L'équation électrochimique s'écrit :



Il s'agit d'une oxydation, l'électrode est donc une anode.

3. $Q = I \times \Delta t = n(e^-) \times F$.

D'après l'équation de la réaction électrochimique,

$$\frac{n(e^-)}{2} = n(\text{Sn}) \text{ donc } Q = I \times \Delta t = 2 \times n(\text{Sn}) \times F.$$

$$\text{On obtient : } n(\text{Sn}) = \frac{I \times \Delta t}{2 \times F} = 7,5 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

La masse $m(\text{Sn})$ d'étain qui se dépose est égale à :
 $m(\text{Sn}) = n(\text{Sn}) \times M(\text{Sn}) = 0,89 \text{ g}$.

8 Estimer la durée d'une électrolyse

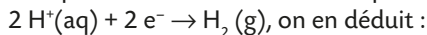
1. Le dihydrogène $\text{H}_2(\text{g})$ est le réducteur du couple $\text{H}^+(\text{aq}) / \text{H}_2(\text{g})$. Pour le former, il faut donc réaliser une réduction. L'électrode doit être une cathode et doit recevoir des électrons. Elle doit donc être branchée à la borne - du générateur.

2. Supposons un rendement de 100 %.

• La charge totale circulant s'exprime par :

$$Q = I \times \Delta t = n(e^-) \times F.$$

• D'après la réaction électrochimique :



$$\frac{n(e^-)}{2} = n(\text{H}_2)_{\text{max}} \Rightarrow I \times \Delta t = 2 \times n(\text{H}_2)_{\text{max}} \times F.$$

$$\text{Or } V(\text{H}_2)_{\text{max}} = n(\text{H}_2)_{\text{max}} \times V_m \Rightarrow n(\text{H}_2)_{\text{max}} = \frac{V(\text{H}_2)_{\text{max}}}{V_m}.$$

$$\Rightarrow I \times \Delta t = \frac{2 \times V(\text{H}_2)_{\text{max}} \times F}{V_m}$$

$$\Rightarrow V(\text{H}_2)_{\text{max}} = \frac{I \times \Delta t \times V_m}{2 \times F}$$

$$\text{Or } \eta = \frac{V(\text{H}_2)_{\text{produit}}}{V(\text{H}_2)_{\text{max}}} = \frac{V(\text{H}_2)_{\text{produit}} \times 2 \times F}{I \times \Delta t \times V_m}$$

$$\Rightarrow \Delta t = 2 \times \frac{V(\text{H}_2)_{\text{produit}} \times F}{I \times \eta \times V_m}.$$

Application numérique :

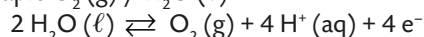
$$\Delta t = 2 \times \frac{3\,686 \text{ L} \times 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}}{10 \times 10^3 \text{ A} \times 0,80 \times 24,5 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}}$$

$$\Delta t = 3,6 \times 10^3 \text{ s}.$$

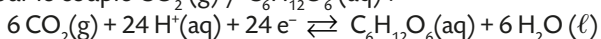
9 Déterminer un type de conversion

1. Les demi-équations électroniques s'écrivent :

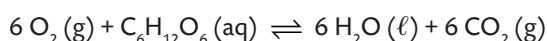
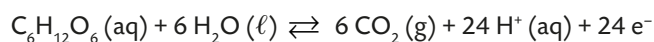
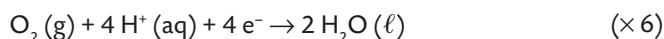
• pour le couple $\text{O}_2(\text{g}) / \text{H}_2\text{O}(\ell)$:



• pour le couple $\text{CO}_2(\text{g}) / \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{aq})$:



2. L'équation de la réaction s'écrit :

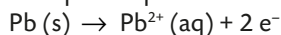


3.a. Si sans lumière, la photosynthèse n'a pas lieu, c'est que la lumière force le système à évoluer dans le sens de consommation du glucose. Elle apporte l'énergie nécessaire à la transformation.

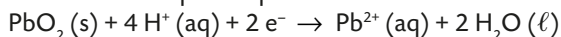
b. Lors de la photosynthèse, se produit une conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique.

10 Étudier le fonctionnement d'un accumulateur

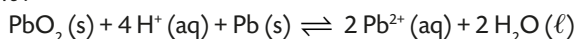
1.a. • À l'anode, se produit l'oxydation du plomb $\text{Pb}(\text{s})$ suivant la réaction électrochimique d'équation :



• À la cathode, le dioxyde de plomb $\text{PbO}_2(\text{s})$ se réduit suivant la réaction électrochimique d'équation :

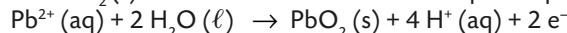


b. L'équation de fonctionnement de la pile s'obtient en combinant les deux équations des réactions électrochimiques. L'équation s'écrit :

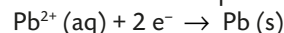


c. Lors de la décharge, de l'énergie chimique est convertie en énergie électrique.

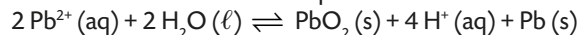
2. • À l'anode, les ions plomb (II) $\text{Pb}^{2+}(\text{aq})$ s'oxydent en dioxyde de plomb $\text{PbO}_2(\text{s})$ suivant la réaction électrochimique d'équation :



• À la cathode, les ions plomb (II) $\text{Pb}^{2+}(\text{aq})$ se réduisent en plomb $\text{Pb}(\text{s})$ suivant la réaction électrochimique d'équation :

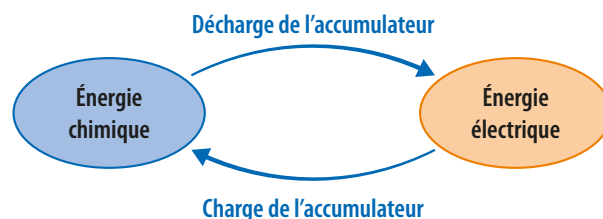


L'équation de fonctionnement est opposée à l'équation de la réaction de fonctionnement de la pile :



• Lors de la décharge, l'énergie électrique est convertie en énergie chimique.

3. Ce dispositif présente l'intérêt de stocker de l'énergie.



Exercices

S'entraîner

p. 184

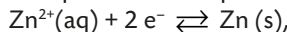
11 Connaître les critères de réussite

Zincage par électrolyse

• Expression de la charge totale Q circulant :

$$Q = I \times \Delta t = n(e^-) \times F.$$

• D'après la demi-équation électronique :



$$\text{on en déduit : } \frac{n(e^-)}{2} = n(\text{Zn}).$$

$$\Rightarrow I \times \Delta t = 2 \times n(\text{Zn}) \times F = \frac{2 \times m(\text{Zn}) \times F}{M(\text{Zn})}.$$

• Expression de la masse $m(\text{Zn})$ de zinc se déposant :

$$m(\text{Zn}) = \rho(\text{Zn}) \times V = \rho(\text{Zn}) \times S \times e \text{ avec } e, \text{ l'épaisseur du dépôt.}$$

$$\Rightarrow I \times \Delta t = \frac{2 \times \rho(\text{Zn}) \times S \times e \times F}{M(\text{Zn})}$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{2 \times \rho(\text{Zn}) \times S \times e \times F}{M(\text{Zn}) \times I}$$

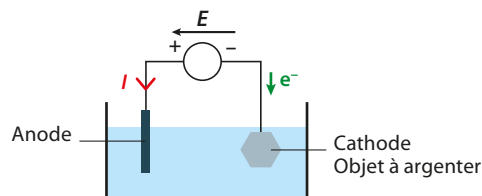
Application numérique :

$$\Delta t = \frac{2 \times 7,1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 15 \text{ m}^2 \times 60 \times 10^{-6} \text{ m} \times 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}}{65,4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} \times 600 \text{ A}}$$

$$\Delta t = 3,1 \times 10^4 \text{ s} = 8,7 \text{ h}.$$

12 Des couverts en métal argenté

1.



On branche plusieurs anodes sur le générateur à la borne + pour que le dépôt soit bien homogène de chaque côté de la pièce à recouvrir.

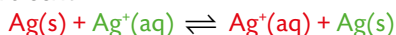
2. L'objet métallique à argenter joue le rôle de cathode, ce qui permet de réaliser un dépôt métallique sur la pièce à argenter.

3.a. Les électrons partent de l'anode, il y a donc oxydation de l'argent pour former des ions argent (I) Ag^+ (aq).

b. À l'anode, des ions Ag^+ (aq) sont produits. L'équation électrochimique s'écrit :



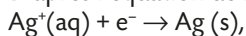
4. L'équation s'écrit :



Il s'agit d'une électrolyse à anode soluble car l'anode est consommée au fur et à mesure de la transformation.

5. On a : $Q = I \times \Delta t = n(\text{e}^-) \times F$.

D'après l'équation de la réaction électrochimique,



$$n(\text{e}^-) = n(\text{Ag}) \text{ donc } Q = I \times \Delta t = n(\text{Ag}) \times F.$$

$$\text{On obtient : } n(\text{Ag}) = \frac{I \times \Delta t}{F}$$

$$\text{soit } m(\text{Ag}) = n(\text{Ag}) \times M(\text{Ag}) = \frac{I \times \Delta t \times M(\text{Ag})}{F}.$$

6. On a : $m(\text{Ag}) = \rho(\text{Ag}) \times V = \rho(\text{Ag}) \times S \times e$ avec e , l'épaisseur du dépôt.

$$\text{Soit } e = \frac{I \times \Delta t \times M(\text{Ag})}{F \times \rho(\text{Ag}) \times S}$$

$$e = \frac{0,70 \text{ A} \times 30 \times 60 \text{ s} \times 108 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} \times 10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \times 70 \text{ cm}^2}$$

$$e = 2,0 \times 10^{-3} \text{ cm} = 20 \text{ } \mu\text{m}.$$

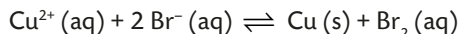
Le poinçon à appliquer comporte le chiffre II.

13 Électrolyse et quotient de réaction

1. Les ions cuivre (II) Cu^{2+} (aq) se réduisent en cuivre Cu (s) et les ions bromure Br^- (aq) s'oxydent en dibrome Br_2 (aq). Les réactions électrochimiques admettent les équations suivantes :



En combinant les réactions électrochimiques, l'équation de la réaction est obtenue :



2.a. À l'état initial, le quotient de réaction s'exprime par :

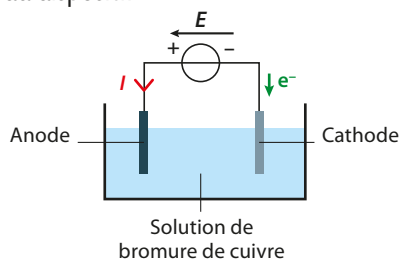
$$Q_{r,i} = \frac{[\text{Br}_2]_i \times (c^\circ)^2}{[\text{Cu}^{2+}]_i \times [\text{Br}^-]_i^2} = 0,$$

car la concentration en dibrome $[\text{Br}_2]_i = 0$.

$Q_{r,i} < K$. La transformation évolue dans le sens direct de l'équation.

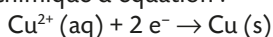
b. En revanche, la valeur très faible de K laisse envisager un avancement extrêmement limité. L'état d'équilibre, sans apport d'énergie, diffère très peu de l'état initial. Il est donc nécessaire de réaliser une électrolyse.

3.a. Schéma du dispositif :

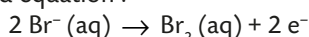


b. L'électrode reliée à la borne - reçoit des électrons. Cette électrode est donc le siège d'une réduction : il s'agit d'une cathode. L'électrode reliée à la borne + libère des électrons, une oxydation s'y produit : l'électrode joue le rôle d'anode. Le sens conventionnel du courant est opposé au sens de circulation des électrons.

c. • À la cathode, la réduction des ions Cu^{2+} (aq) se produit selon la réaction électrochimique d'équation :



• À l'anode, les ions bromure Br^- (aq) s'oxydent selon la réaction électrochimique d'équation :

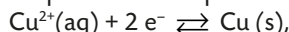


4.a. • Expression de la charge totale Q circulant :

$$Q = I \times \Delta t = n(\text{e}^-) \times F.$$

• Le mélange initial est stœchiométrique.

D'après la demi-équation électronique :



$$\text{on en déduit : } \frac{n(\text{e}^-)}{2} = n(\text{Cu}) = x_f$$

$$\Rightarrow I \times \Delta t = 2 \times x_f \times F$$

$$\Rightarrow x_f = \frac{I \times \Delta t}{2 \times F}$$

Application numérique :

$$x_f = \frac{4,0 \text{ A} \times 3\,600 \text{ s}}{2 \times 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}} = 7,5 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

b. Tableau d'avancement :

| Équation de la réaction | | $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Br}^-(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s}) + \text{Br}_2(\text{aq})$ | | | |
|-------------------------|-------------------|--|-------------------|----------------|------------------|
| État du système | Avancement (mmol) | Quantités de matière (en mmol) | | | |
| | | $n(\text{Cu}^{2+})$ | $n(\text{Br}^-)$ | $n(\text{Cu})$ | $n(\text{Br}_2)$ |
| État initial | $x = 0$ | 100 | 200 | 0 | 0 |
| État final | $x = x_f = 75$ | $100 - x_f = 25$ | $200 - 2x_f = 50$ | $x_f = 75$ | $x_f = 75$ |

$$\text{soit } [\text{Cu}^{2+}]_f = 1,3 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

$$[\text{Br}^-]_f = 2,5 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}; [\text{Br}_2]_f = 3,8 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

$$c. Q_{r,f} = \frac{[\text{Br}_2]_f \times (c^\circ)^2}{[\text{Br}^-]_f^2 \times [\text{Cu}^{2+}]_f}$$

$$Q_{r,f} = \frac{3,8 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 1^2 \text{ mol}^2 \cdot \text{L}^{-2}}{(2,5 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1})^2 \times 1,3 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}}$$

$$Q_{r,f} = 47 > K.$$

Le quotient de réaction Q_r s'est éloigné de la constante d'équilibre lors de l'électrolyse.

14 Résolution de problème

Des récifs coralliens artificiels

1^{re} étape : Bien comprendre la question posée

1. Le carbonate de calcium CaCO_3 (s) provient d'une réaction entre les ions calcium Ca^{2+} (aq), le dioxyde de carbone dissous CO_2 , H_2O (aq) et les ions hydroxyde HO^- (aq).

2. Les ions calcium Ca^{2+} (aq) et le dioxyde de carbone dissous sont présents dans le système. Les ions hydroxyde HO^- (aq) sont formés par la réaction d'électrolyse.

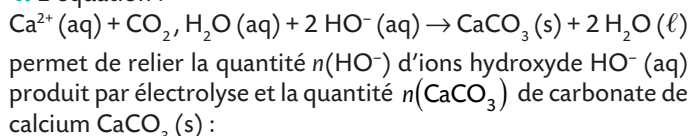
2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. Les ions hydroxyde HO^- (aq) sont formés à la cathode : $n(\text{HO}^-) = n(\text{e}^-)$.

2. L'intensité du courant dans le circuit est égale à 10 A.

3. Le volume V du dépôt peut s'exprimer à l'aide de la surface S de la structure métallique et de l'épaisseur de la couche du dépôt.

4. L'équation :



$$\frac{n(\text{HO}^-)}{2} = n(\text{CaCO}_3).$$

3^e étape : Dégager la problématique

Déterminer la quantité d'hydroxyde HO^- (aq) nécessaire au dépôt et en déduire la durée de l'électrolyse.

4^e étape : Construire la réponse

- Écrire la relation entre la quantité $n(\text{CaCO}_3)$ de carbonate de calcium et la quantité $n(\text{HO}^-)$ d'ions hydroxyde HO^- (aq).
- Exploiter la réaction électrochimique pour écrire la relation entre la quantité $n(\text{HO}^-)$ et la quantité d'électrons ayant circulé pendant l'électrolyse.
- Exprimer la charge totale Q .
- En déduire la durée Δt de l'électrolyse.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

L'une des conséquences de l'acidification des océans est l'altération des coraux constitués majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 (s). La croissance des coraux est extrêmement lente. Le procédé Biorock permet d'augmenter la vitesse de renouvellement des coraux. Quelle durée de fonctionnement du procédé permet de produire autant de carbonate de calcium CaCO_3 (s) que la croissance annuelle du corail ?

- Mettre en forme la réponse.

Le carbonate de calcium CaCO_3 (s) déposé durant la durée d'électrolyse est formé par la réaction acido-basique donnée. D'après la stœchiométrie de cette réaction :

$$\frac{n(\text{HO}^-)}{2} = n(\text{CaCO}_3)$$

En revanche, les ions hydroxyde HO^- (aq) sont issus de la réaction électrochimique ayant lieu à la cathode. La relation suivante s'en déduit :

$$\frac{n(e^-)}{1} = \frac{n(\text{HO}^-)}{1}, \text{ soit } n(e^-) = n(\text{HO}^-) = 2 \times n(\text{CaCO}_3)$$

Expression de la charge totale Q circulant :

$$Q = I \times \Delta t = n(e^-) \times F$$

$$\text{donc } I \times \Delta t = 2 \times n(\text{CaCO}_3) \times F$$

Expression de la quantité de carbonate de calcium $n(\text{CaCO}_3)$:

$$n(\text{CaCO}_3) = \frac{m(\text{CaCO}_3)}{M(\text{CaCO}_3)} = \frac{\rho(\text{CaCO}_3) \times V}{M(\text{CaCO}_3)}$$

$$n(\text{CaCO}_3) = \frac{\rho(\text{CaCO}_3) \times S \times \text{épaisseur}}{M(\text{CaCO}_3)}$$

$$\text{donc } I \times \Delta t = \frac{2 \times F \times \rho(\text{CaCO}_3) \times S \times \text{épaisseur}}{M(\text{CaCO}_3)}$$

$$\text{d'où } \Delta t = \frac{2 \times F \times \rho(\text{CaCO}_3) \times S \times \text{épaisseur}}{M(\text{CaCO}_3) \times I}$$

Application numérique :

$$\Delta t = \frac{2 \times 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} \times 2,9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 4 \text{ m}^2 \times 2 \times 10^{-3} \text{ m}}{100 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} \times 10 \text{ A}}$$

$$\Delta t = 4,5 \times 10^6 \text{ s} \approx 52 \text{ jours}$$

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

Le procédé Biorock permet une croissance 7 fois plus rapide que la croissance naturelle. C'est peut-être une perspective intéressante pour lutter contre l'altération des coraux.

15 À chacun son rythme

Nickelage d'une pièce métallique

1. $\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2 e^- \rightarrow \text{Ni}(\text{s})$
2. Expression de la quantité de matière de nickel $\text{Ni}(\text{s})$ se déposant :

$$n(\text{Ni}) = \frac{m(\text{Ni})}{M(\text{Ni})} = \frac{\rho(\text{Ni}) \times V}{M(\text{Ni})} = \frac{\rho(\text{Ni}) \times S \times \text{épaisseur}}{M(\text{Ni})}$$

3. Expression de la charge totale circulant :

$$Q = I \times \Delta t = n(e^-) \times F$$

- D'après la réaction électrochimique, $\frac{n(e^-)}{2} = n(\text{Ni})$

$$\Rightarrow I \times \Delta t = 2 \times n(\text{Ni}) \times F$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{2 \times \rho(\text{Ni}) \times S \times \text{épaisseur} \times F}{I \times M(\text{Ni})}$$

$$4. E = U \times I \times \Delta t = \frac{2 \times U \times I \times \rho(\text{Ni}) \times S \times \text{épaisseur} \times F}{I \times M(\text{Ni})}$$

$$E = \frac{2 \times U \times \rho(\text{Ni}) \times S \times \text{épaisseur} \times F}{M(\text{Ni})}$$

Application numérique :

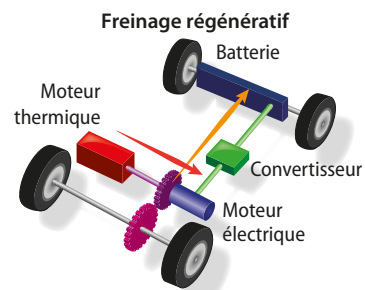
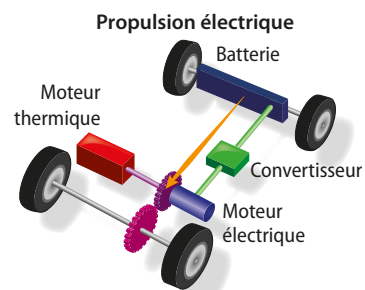
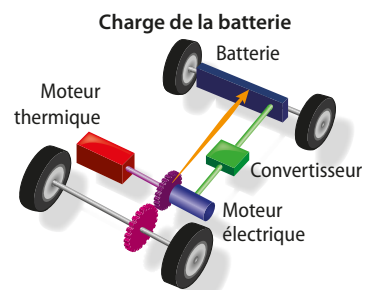
$$E = \frac{2 \times 3 \text{ V} \times 8,9 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-2} \times 40 \times 10^{-6} \times 96\,500}{58,7 \times 10^{-3}}$$

$$E = 3,5 \times 10^5 \text{ J.}$$

16 Rôle d'une batterie Lithium-ion

1.a. La batterie fournit de l'énergie électrique et assiste le moteur thermique. On parle donc d'assistance électrique.

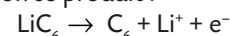
b.



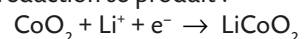
2. Une voiture hybride consomme moins de carburant qu'une voiture à moteur thermique car le moteur thermique n'est pas sollicité en permanence.

3.a. Les réactions électrochimiques s'écrivent :

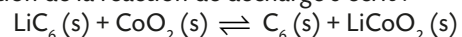
- à l'anode, l'oxydation se produit :



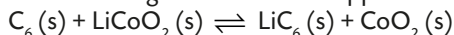
- à la cathode, la réduction se produit :



b. L'équation de la réaction de décharge s'écrit :



4. La réaction de la charge est la réaction opposée soit :



5. Un véhicule hybride permet une économie de consommation de carburant et a une empreinte environnementale plus favorable

(moins de dégagement de gaz à effet de serre). Cependant, pour fabriquer les batteries, des métaux rares sont utilisés. Ces ressources risquent de s'épuiser. Un problème de retraitement se pose également.

Vers le Bac

p. 186

Préparation à l'écrit

17 Obtention de lithium et de dichlore par électrolyse

1. ① : Li^+ ; ② : Li ; ③ : Cl^- ; ④ : Cl_2 ; ⑤ : cathode ; ⑥ : anode

2. $Q = I \times \Delta t = n(e^-) \times F$.

D'après la demi-équation redox : $\text{Li}(\text{s}) \rightarrow \text{Li}^+(\text{aq}) + e^-$

on déduit : $n(e^-) = n(\text{Li})$.

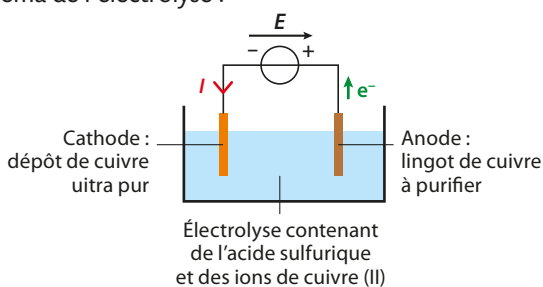
$$I \times \Delta t = n(\text{Li}) \times F = \frac{m(\text{Li}) \times F}{M(\text{Li})} \text{ or } I = j \times S.$$

$$\text{Donc } j \times S \times \Delta t = \frac{m(\text{Li}) \times F}{M(\text{Li})} \text{ soit } S = \frac{m(\text{Li}) \times F}{j \times M(\text{Li}) \times \Delta t}.$$

On obtient $6,3 \text{ m}^2 \leq S \leq 7,3 \text{ m}^2$.

18 Obtention de cuivre très pur par électrolyse

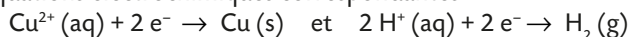
1. Schéma de l'électrolyse :



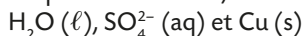
2. Sens du courant : de la borne + à la borne - en dehors des bornes du générateur ; sens de déplacement des électrons : sens opposé à celui du courant.

3. D'après les données, les oxydants présents sont : $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$; $\text{H}^+(\text{aq})$.

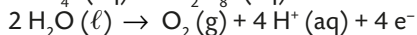
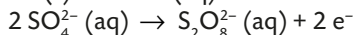
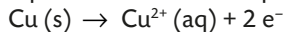
Équations électrochimiques correspondantes :



D'après les données, les réducteurs présents sont :

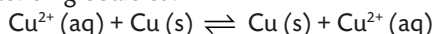


Équations électrochimiques correspondantes :



4. Il est précisé dans l'énoncé qu'on n'observe pas de dégagement gazeux et que les ions sulfate $\text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$ sont électro-inactifs. Les seules réactions électrochimiques possibles sont donc celles qui font intervenir le couple $(\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) / \text{Cu}(\text{s}))$.

Ainsi, la réaction globale est :



5. L'anode constituée de cuivre impur est le siège d'une oxydation. Le cuivre métallique forme des ions $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$ sous l'effet du passage du courant. Les autres impuretés sont également solubilisées.

La faible tension appliquée ne permet pas de réduire une autre espèce que les ions $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$ qui sont réduits et se déposent à la cathode.

On parle d'électrolyse à anode soluble car l'anode constitue ici le générateur de cuivre. Les anodes doivent être remplacées toutes les 3 à 4 semaines.

Le cuivre impur est ainsi purifié par électrolyse : c'est l'électroraffinage.

6. On exprime la charge de deux façons : $Q = I \times \Delta t = n(e^-) \times F$. D'après l'équation électrochimique, on déduit que :

$$n(\text{Cu}) = \frac{n(e^-)}{2}.$$

$$\text{Alors } I \times \Delta t = 2 \times n(\text{Cu}) \times F = 2 \times \frac{m(\text{Cu})}{M(\text{Cu})} \times F.$$

$$\text{Ainsi } \Delta t = \frac{2 \times m(\text{Cu}) \times F}{I \times M(\text{Cu})} \text{ avec une masse de 280 kg et } I = 350 \text{ A.}$$

Application numérique :

$$\Delta t = 2,4 \times 10^6 \text{ s} = 6,8 \times 10^2 \text{ h} = 28 \text{ jours,}$$

soient 4 semaines comme indiqué dans l'énoncé.

On retrouve bien la durée d'électrolyse proposée.

7. On utilise la relation fournie pour l'énergie électrique (attention aux unités !)

$$E = U \times I \times \Delta t \text{ avec } U = 0,30 \text{ V ; } \Delta t = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s.}$$

On cherche l'intensité telle que $m = 1,0$ tonne, soit $1,0 \times 10^6 \text{ g}$.

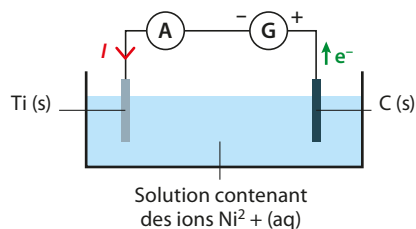
On applique la relation $I = \frac{2 \times m(\text{Cu}) \times F}{\Delta t \times M(\text{Cu})}$ obtenue d'après la question précédente.

On obtient $I = 844 \text{ kA}$ (en prenant une durée de 1 h soit 3600 s, car l'unité de l'énergie est le kWh).

On obtient $E = 253 \text{ kWh}$, ce qui est incohérent avec l'énoncé.

Préparation à l'ECE

1.



2. Observations : dépôt métallique de $\text{Ni}(\text{s})$ à la cathode et dégagement gazeux de dioxygène $\text{O}_2(\text{g})$ à l'anode. La solution contenant les ions nickel (II) Ni^{2+} initialement verte se décolore peu à peu.

À deux, c'est mieux**Quelques pistes d'argumentation pour l'évaluation orale 1 :**

- Lorsque le dihydrogène est consommé dans le moteur, le seul produit formé est de la vapeur d'eau ; il n'y a pas de dégagement de dioxyde de carbone.
- Ce n'est pas une énergie fossile.
- La voiture à hydrogène est très silencieuse.
- Le dihydrogène peut être produit par électrolyse à partir d'énergies renouvelables (en utilisant des cellules photovoltaïques).

Quelques pistes d'argumentation pour l'évaluation orale 2 :

- Le dihydrogène n'est pas facile à stocker ou à transporter.
- Le réservoir prend de la place et la pile est lourde.
- La production de dihydrogène dégage beaucoup de dioxyde de carbone.
- Produire du dihydrogène revient très cher.

Je m'exprime à l'oral sur**Forcer l'évolution d'un système**

- **Pourquoi utiliser un générateur pour effectuer une électrolyse ?**
Le générateur apporte l'énergie nécessaire pour permettre à la transformation limitée de se produire.
- **Définir les mots anode et cathode.**
L'anode est l'électrode où se produit l'oxydation. La cathode est l'électrode où se produit la réduction.
- **Citer des applications nécessitant une électrolyse.**
On peut citer la recharge d'un accumulateur, la photosynthèse, etc.
- **Qu'est-ce qu'un accumulateur ?**
Un accumulateur est un convertisseur d'énergie pouvant se comporter comme une pile ou un électrolyseur.

10

Synthèses organiques

Programme officiel

Constitution et transformation de la matière

| 4. Élaborer des stratégies en synthèse organique | |
|--|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| Structure et propriétés Formule topologique. Familles fonctionnelles : esters, amines, amides et halogénoalcane. Squelettes carbonés insaturés, cycliques. Isomérisation de constitution. Polymères. | Exploiter des règles de nomenclature fournies pour nommer une espèce chimique ou représenter l'entité associée. Représenter des formules topologiques d'isomères de constitution, à partir d'une formule brute ou semi-développée. Identifier le motif d'un polymère à partir de sa formule. Citer des polymères naturels et synthétiques et des utilisations courantes des polymères. |
| Optimisation d'une étape de synthèse Optimisation de la vitesse de formation d'un produit et du rendement d'une synthèse. | Identifier, dans un protocole, les opérations réalisées pour optimiser la vitesse de formation d'un produit. Justifier l'augmentation du rendement d'une synthèse par introduction d'un excès d'un réactif ou par élimination d'un produit du milieu réactionnel. <i>Mettre en œuvre un protocole de synthèse pour étudier l'influence de la modification des conditions expérimentales sur le rendement ou la vitesse.</i> |
| Stratégie de synthèse multi-étapes Modification de groupe caractéristique, modification de chaîne carbonée, polymérisation. Protection / déprotection. Synthèses écoresponsables. | Élaborer une séquence réactionnelle de synthèse d'une espèce à partir d'une banque de réactions. Identifier des réactions d'oxydo-réduction, acide-base, de substitution, d'addition, d'élimination. Identifier des étapes de protection / déprotection et justifier leur intérêt, à partir d'une banque de réactions. <i>Mettre en œuvre un protocole de synthèse conduisant à la modification d'un groupe caractéristique ou d'une chaîne carbonée.</i> Discuter l'impact environnemental d'une synthèse et proposer des améliorations à l'aide de données fournies, par exemple en termes d'énergie, de formation et valorisation de sous-produits et de choix des réactifs et solvants. |

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

| | Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|----------------------|---|---|---|
| SECONDE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> Espèce chimique. Solvant, soluté. Masse, volume, masse volumique. Mélanges homogènes et hétérogènes. Quantités de matière. Concentration en masse. Transformation chimique, réaction chimique, équation. Espèce spectatrice, stœchiométrie, réactif limitant. Synthèse d'une espèce chimique. | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> la quantité de matière d'une espèce ; la valeur d'une concentration en masse. Établir l'équation de réaction associée et l'ajuster. Réaliser le schéma légendé d'un montage à reflux et d'une CCM. | $\rho = \frac{m}{V}$ $t = \frac{m}{V}$ Équation chimique. |
| Microscopique | Entités chimiques : molécules, atomes, ions. | Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> la masse d'une entité à partir de sa formule brute et de la masse des atomes qui la composent ; le nombre d'entités et la quantité de matière (en mol) d'une espèce dans une masse d'échantillon. | $N = \frac{m}{m_{\text{entité}}}$ $n = \frac{N}{N_A}$ |

| PREMIÈRE | | | |
|---------------|---|--|---|
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Espèce chimique. • Masse volumique, pression, température, masse molaire, volume molaire d'un gaz. • Concentration en quantité de matière. • Transformation modélisée par une réaction d'oxydoréduction. • Évolution des quantités de matière lors d'une transformation. • Titrage avec suivi colorimétrique. • Extraction par solvant. Solubilité dans un solvant. Miscibilité de deux liquides. • Nom d'une espèce. • Spectroscopie IR. • Synthèse d'une espèce chimique. • Rendement d'une synthèse. | <ul style="list-style-type: none"> • Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – la quantité de matière, la masse, la masse molaire, le volume d'une espèce ; – la concentration en quantité de matière. • Établir une équation de la réaction entre un oxydant et un réducteur. • Déterminer : <ul style="list-style-type: none"> – le réactif limitant ; – la composition d'un système dans l'état final. • Établir la relation entre les quantités de matière de réactifs à l'équivalence d'un titrage. • Interpréter un protocole d'extraction liquide-liquide. • Justifier le nom d'une espèce. • Identifier des groupes caractéristiques par spectroscopie IR. • Identifier les étapes d'une synthèse. • Calculer un rendement. | <ul style="list-style-type: none"> • $n = \frac{m}{M}$ • $C = \frac{n}{V}$ • Équation d'oxydoréduction, demi-équation électronique. • Relation à l'équivalence. • $\eta = \frac{m_{\text{exp}}}{m_{\text{th}}}$ |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Entités chimiques : molécules, atomes, ions. • Transfert d'électrons. • Interaction entre entités. • Formules brutes, semi-développées. • Groupes caractéristiques. | <ul style="list-style-type: none"> • Identifier le transfert d'électrons entre deux réactifs. • Identifier des groupes caractéristiques. | |
| TERMINALE | | | |
| Macroscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Masse volumique, température, pression, titre massique, densité. • Titrages. • Facteurs cinétiques : température, concentration des réactifs. • Vitesse de formation d'un produit. • Catalyse, catalyseur. • Spectroscopie IR et groupes caractéristiques. • Quotient de réaction Q_r, constante d'équilibre K. | <ul style="list-style-type: none"> • Exploiter un spectre IR pour identifier des groupes caractéristiques. • Exploiter un titrage pour déterminer une quantité de matière, une concentration ou une masse. • Identifier des facteurs cinétiques. • Déterminer une vitesse volumique de formation d'un produit. • Déterminer le sens d'évolution spontané d'un système. | <ul style="list-style-type: none"> • Modèle du gaz parfait. • $v_{\text{app}}(P)_t = \frac{d[P]}{dt}$ • $v_{\text{disp}}(R)_t = -\frac{d[R]}{dt}$ • Comparaison de Q_r et K. |
| Microscopique | <ul style="list-style-type: none"> • Entités chimiques : molécules, atomes, ions. • Mécanisme réactionnel : acte élémentaire, intermédiaire réactionnel. | <ul style="list-style-type: none"> • Représenter des flèches courbes d'un acte élémentaire. | <ul style="list-style-type: none"> • Chocs entre entités. • Formalisme de la flèche courbe. • Acte élémentaire. |

Vu en première

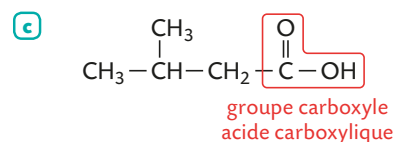
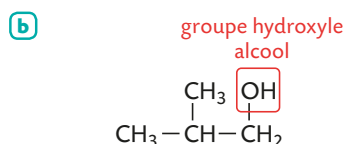
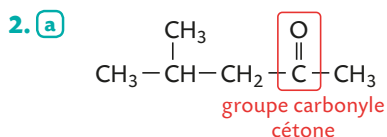
Molécule : modélisation, nom et groupes caractéristiques p. 190

Réactiver ses connaissances

Capsules vidéo de cours :

- Modélisation des molécules
- Groupes caractéristiques
- Nomenclature

1. **a** C₆H₁₂O ; **b** C₄H₁₀O ; **c** C₅H₁₀O₂.



3. **a** • racine = « pentan » car il y a cinq atomes de carbone dans la chaîne principale ;
 • préfixe = « 4-méthyl » car un groupe méthyl est en position 4 (la chaîne principale est numérotée de la droite vers la gauche pour que l'atome de carbone du groupe caractéristique ait le plus petit numéro) ;
 • terminaison = « 2-one » car cette molécule appartient à la famille des cétones.
- b** • racine = « propan » car il y a trois atomes de carbone dans la chaîne principale ;
 • préfixe = « 2-méthyl » car un groupe méthyl est en position 2 (la chaîne principale est numérotée de la droite vers la gauche pour que l'atome de carbone lié au groupe caractéristique ait le plus petit numéro) ;

- terminaison = « 1-ol » car cette molécule appartient à la famille des alcools.
- c** • racine = « butan » car il y a quatre atomes de carbone dans la chaîne principale ;
 • préfixe = « 3-méthyl » car un groupe méthyl est en position 3 (la chaîne principale est numérotée de la droite vers la gauche pour que l'atome de carbone du groupe caractéristique ait le plus petit numéro) ;
 • terminaison = « oïque » car cette molécule appartient à la famille des acides carboxyliques.

Flash test

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

Activité 1

expérimentale Synthèse conduisant à la modification d'un groupe caractéristique p. 191

Capacité exigible

- Mettre en œuvre un protocole de synthèse conduisant à la modification d'un groupe caractéristique ou d'une chaîne carbonée.

Pratique expérimentale

1 Remarques pertinentes sur le protocole :

- L'ajout de glace permet de limiter les hausses de température (réaction exothermique) et permet de baisser la solubilité du produit dans l'eau.
- Sécurité : manipuler les réactifs (solution d'hydroxyde de sodium et anhydride éthanoïque) avec des gants ; porter des lunettes de sécurité et une blouse fermée.
- Observations :
 - Un solide blanc se forme presque instantanément après l'ajout d'anhydride éthanoïque. Il s'agit de l'éthanoate de vanilline.
 - Le solide est sous forme de poudre. Une recristallisation permettrait sûrement d'obtenir des beaux cristaux.
- Résultats :
 - Masse théorique : $m_{th} = 1,8$ g car la vanilline est en défaut. La masse obtenue est de 1,0 g. Le rendement est de 56 %. On a eu des pertes lors de la filtration car on observe du solide dans le filtrat. Il aurait fallu refiltrer.
 - CCM : la CCM ne montre pas la présence d'impuretés car on observe une seule tache au niveau du produit synthétisé. Il s'agit bien d'éthanoate de vanilline en comparant avec la référence.
 - Banc Köfler : la mesure du point de fusion du solide obtenu (77 °C) ne montre pas la présence d'impuretés.

2 Il s'agit de la famille des esters.

3 • Isolement du solide :

- Refroidir le milieu réactionnel dans un bain de glace.
- Filtrer sous pression réduite.
- Rincer l'erenmeyer avec le minimum d'eau glacée puis filtrer.
- Arrêter l'aspiration, ajouter le minimum d'eau glacée et triturer le solide.

- Remettre en route l'aspiration puis récupérer le solide lorsque le liquide ne s'écoule plus.
- Mettre le solide à l'étuve pour éliminer les dernières traces de solvant.

• Caractérisation du solide :

- Mesure de la température de fusion du solide à l'aide d'un banc Köfler étalonné.
- CCM : dissoudre les solides, effectuer les dépôts sur la plaque à CCM et éluer. Révéler la plaque si nécessaire. On dépose le produit synthétisé, une référence et la vanilline (tout est en solution).

Un pas vers le cours

- 4 Synthèse : montage à reflux ; isolement : filtration, lavages et séchage ; caractérisation : CCM et mesure de la température de fusion ; purification : non effectuée.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

- Un point fort de ce TP de chimie organique est qu'il est largement réalisable en 2 heures car il ne nécessite pas de temps de reflux.
- Peser la vanilline au préalable permet de gagner du temps et de vérifier que les élèves rincent bien le pilulier contenant le solide.
- Lors de la CCM, on pourra même faire remarquer que la vanilline a un rapport frontal plus faible que l'éthanoate de vanilline à cause du groupement OH qui permet l'établissement de liaisons hydrogène avec la silice.
- Bien penser à allumer l'étuve et le banc Köfler en début de séance.
- L'étuve doit être réglée autour de 55 °C car la température de fusion du solide est faible (77 °C).
- Il est possible de recristalliser le solide dans de l'éthanol à 95° (gratter avec une tige en verre le fond du ballon pour favoriser l'apparition des premiers cristaux).
- Pour la CCM, utiliser de l'acétate d'éthyle pour dissoudre les solides. L'éluant utilisé est un mélange acétate d'éthyle / éther de pétrole dans les proportions en volume 1/2. Révéler sous UV.

Activité 2

expérimentale en groupe Rendement et vitesse

p. 192

Capacité exigible

- Mettre en œuvre un protocole de synthèse pour étudier l'influence de la modification des conditions expérimentales sur le rendement ou la vitesse.

Pratique expérimentale

Défi 1

Par le professeur ou le préparateur : Lors du titrage de 1 mL d'acide sulfurique commercial (96 % ; $d = 1,83$) par une solution de soude à $2,65 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, on obtient :

$$V_{\text{éq}} = 12,8 \text{ mL soit } n(\text{H}^+) = 0,0339 \text{ mol dans 1 mL.}$$

Binôme 1 : $V_2 = 10 \text{ mL}$ pour être dans les conditions stœchiométriques. Lors du dosage avec la solution de soude de concentration $C_B = 0,70 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (étalonnée à $0,699 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), on obtient $V_{\text{éq}} = 10,05 \text{ mL}$. On a donc :

$$n(\text{acide restant}) = C_B \times V_{\text{éq}} \times 26 - n(\text{H}^+) = 0,149 \text{ mol.}$$

$$n(\text{ester}) = n(\text{acide réagit}) = n_0 - n(\text{acide restant})$$

$$n(\text{ester}) = 0,116 \text{ mol.}$$

Le réactif limitant étant l'acide méthanoïque, $\eta = 44 \%$.

Binôme 2 : Lors du dosage avec la solution de soude de concentration $C_B = 0,70 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (étalonnée à $0,699 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) on obtient $V_{\text{éq}} = 4,95 \text{ mL}$. On a donc :

$$n(\text{acide restant}) = C_B \times V_{\text{éq}} \times 38 - n(\text{H}^+) = 0,129 \text{ mol.}$$

On en déduit donc :

$$n(\text{ester}) = n(\text{acide réagit}) = n_0 - n(\text{acide restant})$$

$$n(\text{ester}) = 0,136 \text{ mol.}$$

Le réactif limitant étant l'acide méthanoïque, $\eta = 48 \%$.

Binôme 3 : Il ne reste plus que l'acide sulfurique ; l'acide méthanoïque est totalement consommé : le rendement est proche de 100 %.

Défi 2

On donne ci-dessous la quantité $n(\text{ester})$ formée en fonction du temps pour les deux températures :

| t (min) | Expérience 1 | Expérience 2 |
|---------|--------------|--------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0,158 | 0,194 |
| 10 | 0,173 | 0,224 |
| 15 | 0,189 | 0,244 |
| 30 | 0,216 | 0,268 |
| 45 | 0,234 | 0,282 |

Activité 3

jeu Synthèse et nomenclature

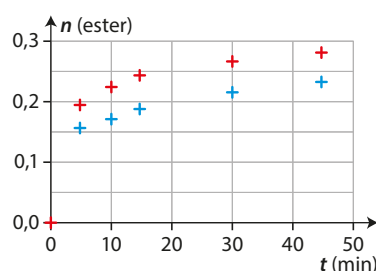
p. 193

Capacités exigibles

- Exploiter des règles de nomenclature fournies pour nommer une espèce chimique ou représenter l'entité associée.
- Élaborer une séquence réactionnelle de synthèse d'une espèce à partir d'une banque de réactions.
- Identifier des réactions d'oxydoréduction, acide-base, de substitution, d'addition et d'élimination.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

- Le jeu n°1 s'apparente au jungle speed. Regrouper les tables pour faire des groupes d'élèves.



Un pas vers le cours

3. Défi 1 : L'introduction d'un réactif en excès permet d'augmenter le rendement de la réaction. Il en est de même si on enlève progressivement un produit de la réaction du milieu réactionnel.

Défi 2 : L'augmentation de température permet d'augmenter la vitesse de formation de l'ester.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

- Le bleu de bromothymol possède deux zones de virage. Pour relever le volume à l'équivalence, il faut prendre en compte le 2^e virage (jaune au bleu). Il est aussi possible d'utiliser la phénolphtaléine.
- Le bleu de thymol, en milieu organique, a tendance à revenir en arrière.
- Attention, il y a des bouteilles d'acide méthanoïque à 80 % de pureté. Préférer celles à 98 %.

QCM

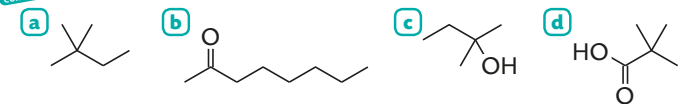
1. B ; 2. A ; 3. B ; 4. B ; 5. A et C ; 6. C ; 7. B ; 8. A ; 9. A et C.

Exercices

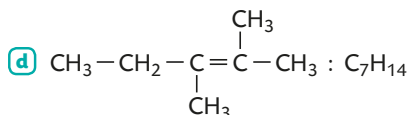
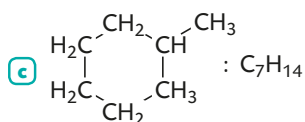
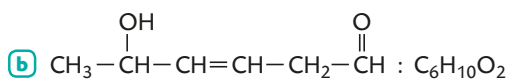
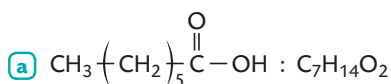
Appliquer le cours

p. 202

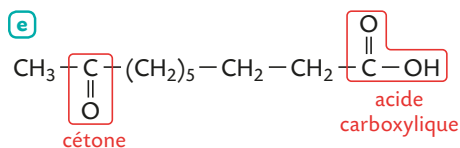
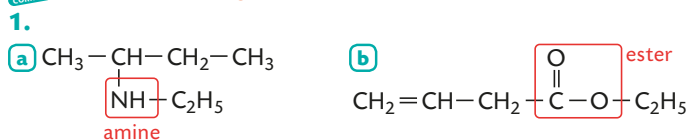
4 Représenter des formules topologiques



5 Exploiter des formules topologiques

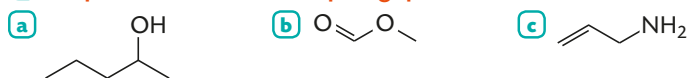


6 Reconnaître un groupe caractéristique



2. Squelettes carbonés saturés : a, d et e.
Squelettes carbonés insaturés : b et c.

7 Proposer des formules topologiques



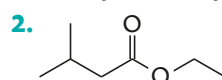
8 Justifier des noms

Molécule a : On repère la présence d'un groupe amine, le suffixe est donc « amine ». La chaîne qui contient le plus d'atomes de carbone est celle qui en contient trois : la racine du nom est « propan ». L'atome d'azote est lié à un groupe méthyl et un groupe éthyl, le préfixe est donc « N-éthyl, N-méthyl ».
Molécule b : On repère la présence d'un groupe ester, le suffixe est donc « oate de yle ». On numérote les deux chaînes carbonées contenant trois atomes de carbone indépendamment à partir de

l'atome de carbone fonctionnel et de l'atome de carbone lié à l'atome d'oxygène. La présence de deux groupes méthyle en position 2 sur chaque chaîne carbonée justifie les préfixes « 2-méthyl ».

9 Nommer une espèce

1. N-éthyl-N-méthylpropanamide



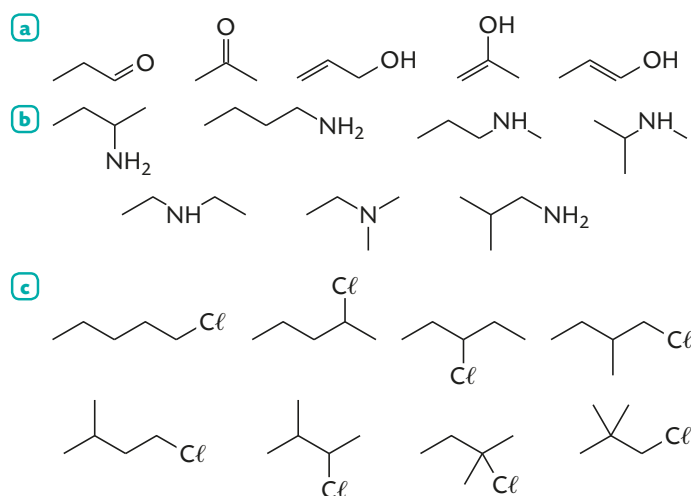
10 Identifier des isomères de constitution

a Les deux molécules n'ont pas la même formule brute : $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$ pour la première et $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$ pour la deuxième. Les espèces correspondantes ne sont pas isomères de constitution.

b Les deux molécules ont la même formule semi-développée. Les espèces sont identiques.

c Les molécules ont même formule brute et des formules semi-développées différentes : les espèces correspondantes sont isomères de constitution.

11 Représenter des isomères de constitution



12 Optimiser un rendement et une vitesse

1. La vitesse de formation de C augmente si la température augmente et/ou si on ajoute un catalyseur.

2. Son rendement augmente si on ajoute en excès l'un des réactifs (le moins coûteux) et/ou si on extrait au fur et à mesure de sa synthèse l'un des produits. En effet, on aura alors $Q_r < K$ et le système évoluera donc dans le sens direct.

13 Justifier un protocole

1.a. L'acide sulfurique n'apparaît pas dans l'équation et il est introduit en faible quantité, ce qui laisse penser qu'il joue le rôle de catalyseur.

b. L'utilisation d'un catalyseur et le chauffage permettent d'augmenter la vitesse de formation de A.

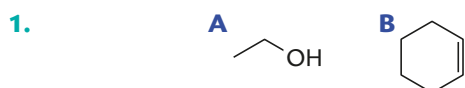
2.a. L'ajout en excès du réactif acide éthanoïque permet d'optimiser le rendement de la synthèse.

b. Si on éliminait l'eau (produit), on aurait $Q_r < K$, ce qui provoquerait une évolution du système dans le sens direct de l'équation.

14 Compléter des étapes d'une synthèse (1)

1. (1) et (2) : modification de groupe ; (3) : modification de chaîne.
2. **A** : NaNH_2 ; **B** : CH_3I ; **C** : CH_3MgBr .

15 Compléter des étapes d'une synthèse (2)

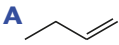
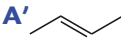


2. Dans les deux cas, c'est le groupe caractéristique qui est modifié car il n'y a pas modification du nombre d'atome de carbone et création/rupture de liaison C-C.

16 Attribuer une catégorie de réaction

1. Réaction (1) : addition ; réaction (2) : substitution.
2. $\text{C}_3\text{H}_6\text{O} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{C}_3\text{H}_8\text{O}$: c'est bien une réduction.

17 Déterminer le produit issu d'une élimination

1. Lors d'une réaction d'élimination, des atomes ou groupes d'atomes, portés par des atomes adjacents, sont éliminés pour former une liaison multiple.
2. **A**  **A'** 

3. $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_8 + \text{H}_2\text{O}$: ce n'est pas une réaction d'oxydoréduction car il n'y a pas d'échange d'électron.

18 Identifier des étapes de protection

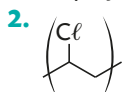
1. Étape de protection : **A** \rightarrow **B** (protection du diol) ; étape de déprotection : **D** \rightarrow **E**.
2. Si les deux fonctions alcools précédentes TsCl pourrait réagir avec les trois fonctions.

19 Identifier des fonctions à protéger

1. Quatre dipeptides possibles : ala-ala ; ala-leu ; leu-ala ; leu-leu.
2. Protections des groupes : amine de la leucine et carboxyle de l'alanine.

20 Représenter un motif

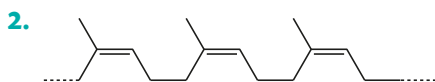
1. Un polymère est un ensemble de macromolécules.



3. Polyéthylène ou polypropylène pour emballage plastique.

21 Représenter un polymère

1. Le motif est l'unité structurale qui se répète dans la macromolécule.



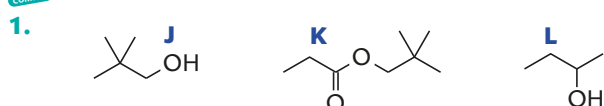
3. Cellulose pour mouchoirs en papier.

Exercices

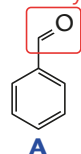
S'entraîner

p. 205

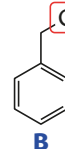
22 Quelques réactions de synthèse



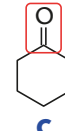
2. aldéhyde



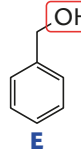
alcool



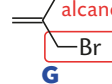
cétone



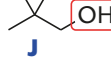
alcool



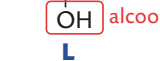
halogéno-alcane



alcool

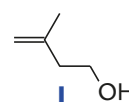
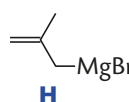
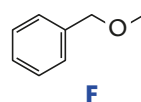
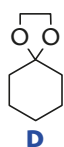


alcool

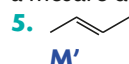


- 3.a. **a** : NaBH_4 dans l'éthanol ; **e** : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-COOH}$; H^+ ; **f** : H^+ ; Δ .

b.



4. Sous-produit formé : H_2O ; optimisation du rendement en mettant en excès l'un des réactifs ou en enlevant l'eau au fur et à mesure de sa formation.



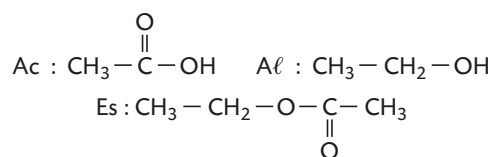
6. **M'** est une réduction : $\text{C}_7\text{H}_6\text{O} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{C}_7\text{H}_8\text{O}$

- 7.a. Réaction d'élimination : **f** ; réactions d'addition : **a** ; réactions de substitution : **c**.

- b. Modifications de groupe : **a** ; modifications de chaîne : **d**.

23 Équilibre d'estérification

1.



2. $K = \frac{0,672}{0,332} \approx 4,12$.

3. $\eta = \frac{0,67}{1,00} = 0,67 = 67\%$.

- 4.a. Il faut résoudre :

$$K = 4,12 = \frac{x_{\text{eq}}^2}{(1,00 - x_{\text{eq}}) \times (10,00 - x_{\text{eq}})}$$

$\Rightarrow x_{\text{eq}} \approx 0,97 \text{ mol}$.

$n_{\text{eq}}(\text{Es}) = n_{\text{eq}}(\text{H}_2\text{O}) = 0,97 \text{ mol}$;

$n_{\text{eq}}(\text{Ac}) = 0,03 \text{ mol}$;

$n_{\text{eq}}(\text{Al}) = 9,03 \text{ mol}$.

b. $\eta = \frac{0,97}{1,00} = 97\%$; l'ajout d'un réactif en excès augmente η .

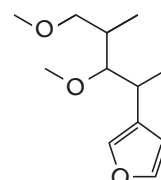
24 À chacun son rythme

Synthèse d'un antibiotique

1. Le groupe caractéristique transformé temporairement en un autre puis reformé est le groupe hydroxyle présent sur les molécules de l'espèce de départ.

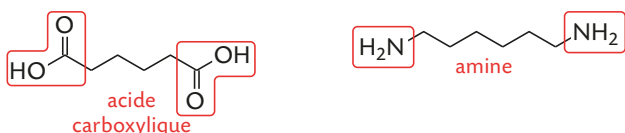
2. Étape (1) : protection ; étape (4) : déprotection.

3. Sans l'étape de protection, le produit obtenu ne serait pas le produit souhaité :



25 Le nylon-6,6

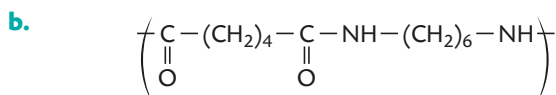
1. a.



b. La chaîne carbonée de chacun des réactifs est constituée de 6 atomes de carbones d'où la racine « hexane ». L'acide hexanedioïque possède deux groupes carboxyle d'où la terminaison « dioïque » (l'indice de position n'est pas précisé car un groupe carboxyle est forcément en bout de chaîne). L'hexane-1,6-diamine possède deux groupes amine en position 1 et 6 d'où la terminaison « 1,6-diamine ».

c. Réaction de substitution.

2. a. Le nylon-6,6 est un polymère qui possède des groupes amide d'où le nom de « polyamide ».



3. Polymère synthétique : PVC ; polymère naturel : cellulose.

4. a. CCM : séparation et identification des constituants d'un mélange basée sur une différence d'affinité entre les différentes espèces déposées et la silice.

b. $M(\text{motif}) = M(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{O}_2) = 226,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

c. $n = \frac{M}{M(\text{motif})} = 531$.

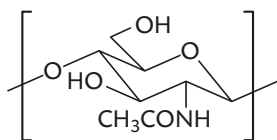
5. a. Ammoniaque : NH_3 .

b. Éliminer l'eau (produit de la réaction) augmente le rendement de la réaction d'ammonolyse.

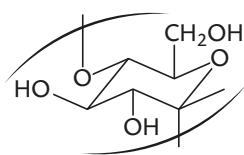
c. Le catalyseur augmente la vitesse de formation des produits.

26 Connaître les critères de réussite Des polymères naturels

1. a.



b.

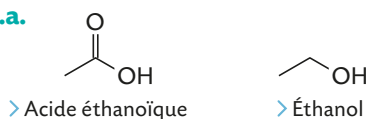


2. a. Groupe caractéristique commun aux deux macromolécules : groupe hydroxyle (fonction alcool).

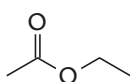
b. Autre groupe caractéristique présent dans la chitine : amide (fonction du même nom).

27 Étude cinétique d'une estérification

1. a.



b.



c. Cet ester est l'éthanoate d'éthyle.

2. a. L'acide sulfurique peut être considéré comme un catalyseur car il est introduit en faible quantité et car il n'apparaît pas dans l'équation-bilan.

b. On plonge les ampoules dans l'eau glacée afin de diminuer fortement la vitesse de formation du produit et ainsi titrer l'acide restant à un instant t bien défini.

c. $v_f(\text{ester}) = \frac{1}{V} \times \frac{dn_{\text{ester}}}{dt}$ avec $V = 0,117 \text{ L}$.

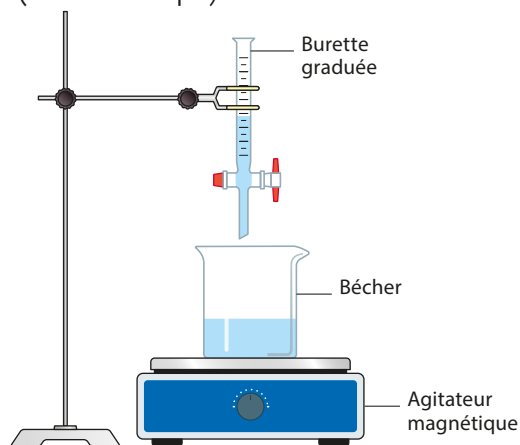
Il faut donc calculer le coefficient directeur des tangentes à t_1 et t_2 pour déduire :

$$v_f(t_1) \approx 2,1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\text{et } v_f(t_2) \approx 6,8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

v_f diminue au cours du temps car la concentration des réactifs diminue (facteur cinétique).

3. a.



b. $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell)$

c. $n_{\text{acide restant}} = C_B \times V_E = n_0 - x$;

$$n_{\text{ester}} = x = n_0 - C_B \times V_E$$

d. La phénolphaléine convient car sa zone de virage commence pour un $\text{pH} > 7$ (milieu basique).

e. On peut aussi réaliser un suivi pH-métrique et déterminer l'équivalence à l'aide de la méthode des tangentes.

4. a. $n_{0,\text{acide}} = \frac{\rho(\text{acide}) \times V(\text{acide})}{M(\text{acide})}$
 $= \frac{1,05 \times 5,7}{60,0} \approx 0,10 \text{ mol}$;

$$n_{0,\text{alcool}} = 0,10 \text{ mol} ;$$

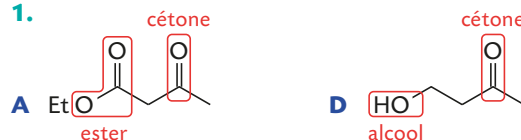
$$n_{f,\text{ester}} = 0,070 \text{ mol}.$$

La transformation n'est donc pas totale. Le rendement vaut donc $\eta = 0,70 = 70 \%$.

b. Augmentation de η : ajouter un réactif en excès ou éliminer un produit au fur et à mesure de sa formation.

28 Réduction d'un composé bifonctionnel

1.

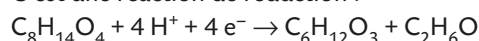


2. a. Ces deux opérations entraînent une diminution de Q_r donc $Q_r < K$, ce qui provoque une évolution du système dans le sens direct de l'équation.

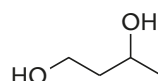
b. Non, un catalyseur accélère la réaction mais ne change pas le rendement.

3. a. B : $\text{C}_8\text{H}_{14}\text{O}_4$; C : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_3$.

C'est une réaction de réduction :

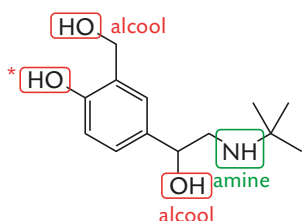


b.



29 Reconstituer une séquence réactionnelle

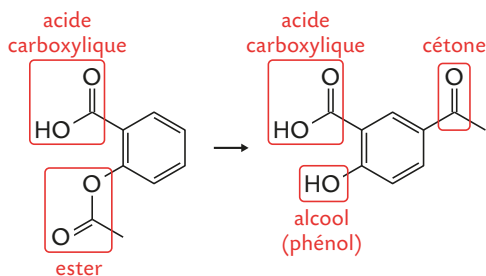
1. 2.



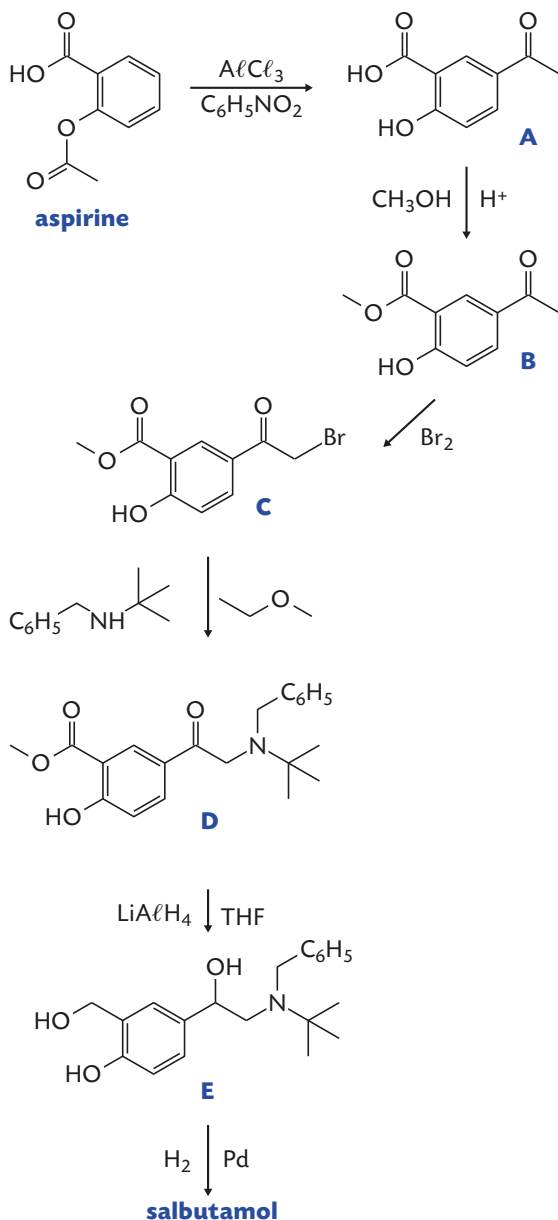
* La fonction associée à ce groupe est le phénol (il sera vu dans le supérieur).

3.a. L'aspirine et **A** ont la même formule brute $C_9H_8O_4$ et des formules semi-développées différentes. Ces espèces sont donc isomères de constitution.

b.



4.



30 Résolution de problème

Synthèses de la juvabione

Une démarche attendue de résolution par l'élève peut être la suivante :

1^{ère} étape : Bien comprendre la question posée

1. Pour quelle(s) raison(s) une synthèse peut-elle être plus efficace qu'une autre ?
2. Quelles sont les différences entre les synthèses des trois équipes ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

- Le rendement global est un critère important pour rendre compte de l'efficacité d'une synthèse.
- Les autres critères (coûts, quantités de réactifs secondaires, etc.) sont évalués en calculant la masse totale de réactif principal mis en jeu.

3^e étape : Dégager la problématique

Quelle synthèse concilie au mieux un rendement global élevé avec d'autres critères tels que le coût, l'écoresponsabilité, etc. ?

4^e étape : Construire la réponse

- Calculer le rendement global de chaque synthèse.
- Calculer la masse totale de réactif principal mis en jeu pour l'équipe 3.
- Conclure.

5^e étape : Rédiger la réponse en trois paragraphes

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

Pour identifier la synthèse la plus efficace de la juvabione, il faut analyser de nombreux critères : le rendement global, le coût, l'écoresponsabilité, etc. Les critères autres que le rendement global peuvent être analysés en calculant la masse totale de réactif principal mis en jeu.

- Mettre en forme la réponse.

Pour calculer $m_{\text{tot}}(3)$, il va falloir remonter tous les calculs depuis le point d'arrivée 1,0 kg de juvabione. Soit n_j la quantité de matière correspondante :

$$n_j = \frac{1,0 \times 10^3}{266} \approx 3,76 \text{ mol.}$$

Comme $\eta_{C\text{-juvabione}}(3) = 0,95$, ces 3,76 moles de juvabione ont été obtenues grâce à $n_3 = 3,96$ mol de **C** soit 1,3 kg.

Comme $\eta_{B-C}(3) = 0,29$, ces 3,96 moles de **C** ont été obtenues grâce à $n_2 = 13,65$ mol de **B** soit 3,7 kg.

Comme $\eta_{A-B}(3) = 0,95$, ces 13,65 moles de **B** ont été obtenues grâce à $n_1 = 14,37$ mol de **A** soit 3,2 kg.

La masse totale recherchée est $m_{\text{tot}}(3) = 1,3 + 3,7 + 3,2 = 8,2$ kg.

Comme $m_{\text{tot}}(2)$ est la plus faible, la synthèse la plus écoresponsable de la juvabione est celle de l'équipe (2). Cela s'explique par le fait que dans la synthèse (2) l'étape de faible rendement est placée en début de synthèse, ce qui évite une perte de matière précieuse en fin de synthèse.

Calcul du rendement total :

$$\eta(\text{Ficini}) = 0,80 \times 0,60 \times 0,55 = 0,26 ;$$

$$\eta(\text{équipe 2}) = 0,35 \times 0,90 \times 0,70 = 0,22 ;$$

$$\eta(\text{équipe 3}) = 0,95 \times 0,29 \times 0,95 = 0,26.$$

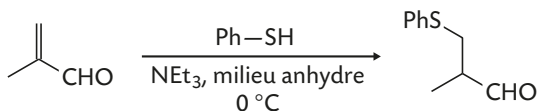
- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

Selon le critère du rendement maximal, l'équipe 3 et l'équipe de Ficini sont à égalité.

Il est donc difficile de conclure. La seule chose à dire, c'est que la synthèse de l'équipe 3 est plus efficace que celle de Ficini puisqu'à rendement total égal, la synthèse est plus écoresponsable.

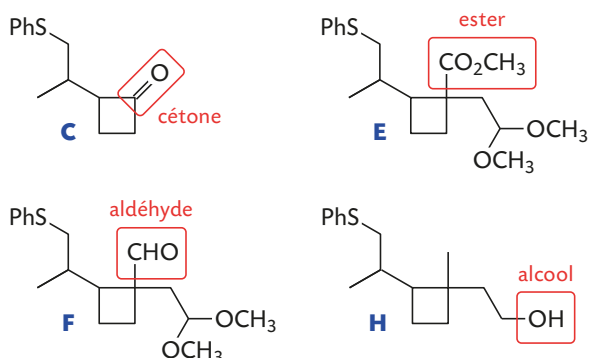
31 Comparaison de deux synthèses

1. a.



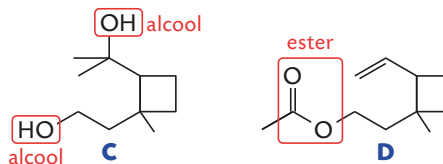
b. On reconnaît la bande de vibration caractéristique de la liaison C-H_{ald} vers 2 700-2 880 cm⁻¹. Et celle intense de la liaison C=O vers 1 720 cm⁻¹.

2.



3. Modifications de chaîne : 2^e, 3^e et 4^e étapes.

4.



5. Modifications de chaîne : 1^{re} et 2^e étapes.

6. $\eta_1 = 0,56 \times 0,65 \times 0,28 \times 1,00 = 10\%$;

$\eta_2 = (0,88)^2 \times 0,93 \times 0,86 \times 0,92 \times 0,85 \times 0,98 \times 0,84$
 $\eta_2 \approx 0,40 = 40\%$.

Même si le nombre d'étapes est plus important, la synthèse de Guedner et son équipe semble plus efficace que celle de Trost et Keeley.

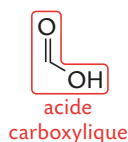
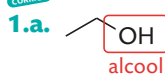
7. Autres critères : quantités de solvants, de réactifs secondaires, aspect énergétique, etc.

Vers le Bac

p. 210

Préparation à l'écrit

32 CORRIGÉ Un ester à odeur de rhum



b. Ester Y : C₃H₆O₂.

c. A : éthanol ; B : acide méthanoïque ; Y : méthanoate d'éthyle.

2. a. Rôle de l'acide sulfurique : catalyseur car introduit en faible quantité et n'apparaît pas dans l'équation.

b. Chauffage et présence d'un catalyseur.

c. $\eta_1 = \frac{0,80}{1,20} \approx 0,67 = 67\%$.

$K = \frac{(0,80)^2}{(0,40)^2} = 4,0$.

3. a. L'ajout de réactif en excès permet d'augmenter le rendement de la synthèse.

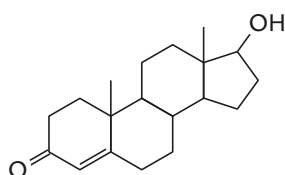
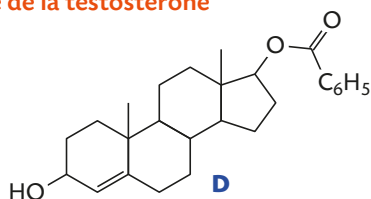
b. $x_{\text{éq}} = 2,4 - 1,4 \approx 1,0 \text{ mol} \Rightarrow \eta_2 = \frac{1,0}{1,2} \approx 0,85 = 85\%$.

4. a. On recueille dans l'éprouvette le liquide le plus volatil (T_{éb} la plus faible) c'est-à-dire Y, l'ester.

b. Le rendement est augmenté car on élimine du ballon l'un des produits de la réaction.

33 CORRIGÉ Synthèse de la testostérone

1. a.



b. Étape (2) : NaBH₄ dans l'éthanol ; étape (5) : CrO₃ dans la pyridine.

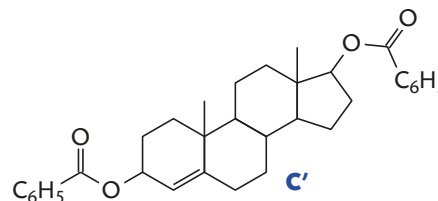
2. Étapes (1), (3), (4), (6) : substitution ; étape (2) : addition ; étape (5) : élimination.

Étape (2) : C₂₃H₃₆O₂ + 2 H⁺ + 2 e⁻ → C₂₃H₃₈O₂ : réduction.

Étape (5) : C₂₆H₃₄O₃ → C₂₆H₃₂O₃ + 2 H⁺ + 2 e⁻ : oxydation.

3. a. Étapes (4) et (6).

b.



Préparation à l'ECE

1. Le montage Dean-Stark permet d'éliminer l'eau (produit de la réaction) au fur et à mesure de sa formation.

d(eau) = 1 > d(cyclohexane), l'eau constitue la phase inférieure. Le cyclohexane qui constitue la phase supérieure retombe en continu dans le ballon.

L'eau est donc éliminé au fur et à mesure de sa formation et le rendement de la réaction est augmenté.

2. $n(\text{alcool}) = \frac{10,8}{108,0} = 0,100 \text{ mol}$

et $n(\text{acide carb.}) = \frac{9,0}{60,0} = 0,15 \text{ mol}$.

Le réactif limitant est donc l'alcool benzylique.

Comme le coefficient stœchiométrique de l'eau vaut 1, $n_{\text{max}}(\text{eau}) = 0,100 \text{ mol}$ soit $m_{\text{max}}(\text{eau}) = 1,8 \text{ g}$ soit $V_{\text{max}}(\text{eau}) = 1,8 \text{ mL}$. Il est donc surprenant d'obtenir 2 mL (> 1,8 mL) d'eau en bas du Dean-Stark !

Hypothèses : du cyclohexane est solubilisé dans l'eau, les réactifs ou le catalyseur contenaient des traces d'eau, etc.

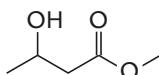
À deux, c'est mieux

Évaluation orale n°1

Le réactif possède deux liaisons C=O mais pour quelle raison une seule d'entre elle réagit ? Ces deux doubles liaisons sont différentes puisque ce composé bifonctionnel appartient à la fois à la famille des cétones et des esters. Cette réaction d'addition met en jeu l'éthan-1,2-diol (HO-CH₂-CH₂-OH) et un catalyseur acide. Il s'agit d'une protection spécifique du groupement carbonyle.

Évaluation orale n°2

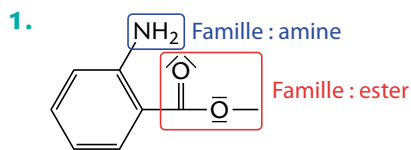
NaBH₄ est un réducteur et EtOH joue le rôle de solvant. Est-ce que les deux fonctions présentes dans le réactif vont être réduites ? NaBH₄ réagit spécifiquement avec les cétones et aldéhydes (et pas avec les esters). La formule du produit est donc :



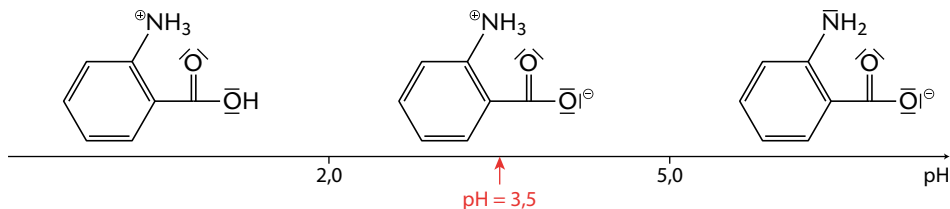
Je m'exprime à l'oral sur

La stratégie de synthèse

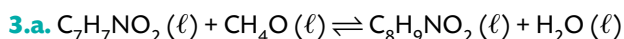
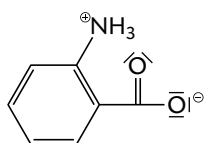
- **Comment augmenter la vitesse de formation d'un produit ?**
On peut augmenter la vitesse de formation d'un produit en augmentant la température du milieu réactionnel, en augmentant la concentration d'un réactif, en ajoutant un catalyseur.
- **Qu'est-ce qu'une réaction d'addition ?**
Lors d'une réaction d'addition, des atomes ou des groupes d'atomes se lient à des atomes engagés dans des liaisons multiples.
- **Définir un polymère.**
Un polymère est un ensemble de macromolécules. Dans une macromolécule, une unité structurale appelée motif se répète un grand nombre de fois.
- **Comment optimiser le rendement d'une synthèse ?**
On peut optimiser le rendement d'une synthèse en introduisant l'un des réactifs en excès ou en éliminant du milieu réactionnel un des produits de la réaction.



2. Le diagramme de prédominance est dessiné ci-dessous.



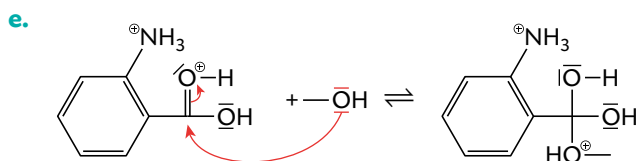
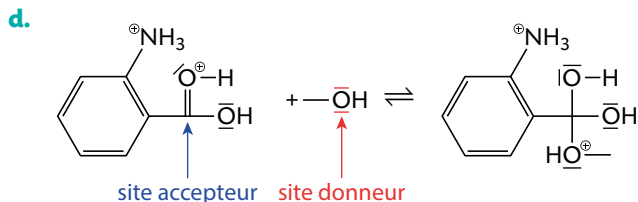
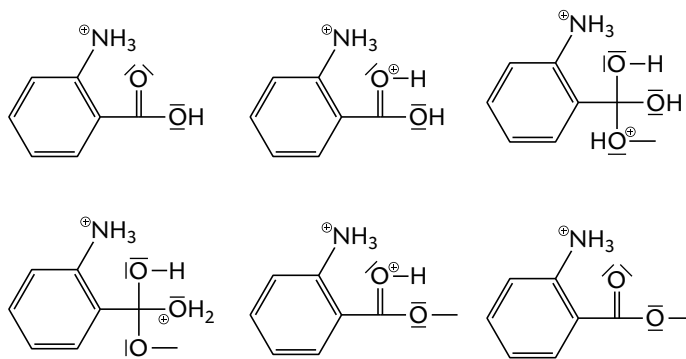
À pH = 3,5, l'espèce qui prédomine est :



b. L'ion hydrogène H^+ est un catalyseur car il intervient dans le mécanisme réactionnel, il est régénéré et il n'apparaît pas dans l'équation de la réaction.

c. Un intermédiaire réactionnel est une entité produite au cours d'un acte élémentaire puis consommé dans un autre. Il n'apparaît pas dans l'équation de la réaction.

Les intermédiaires réactionnels intervenant sont :



4. Les étapes 1 et 4 sont des réactions acide-base car un ion hydrogène H^+ est échangé.

L'étape 5 est une réaction d'élimination car un groupe d'atomes est éliminé pour former une liaison double.

5.a. À l'équilibre, le quotient de réaction $Q_{r,eq}$ est égal à la constante d'équilibre.

| Équation de la réaction | $A (\ell) + B (\ell) \rightleftharpoons E (\ell) + H_2O (\ell)$ | | | |
|-------------------------|---|------------|--------|-----------|
| | Quantités de matière (mmol) | | | |
| État du système | $n(A)$ | $n(B)$ | $n(E)$ | $n(H_2O)$ |
| État initial | 0,38 | 0,38 | 0 | 0 |
| État d'équilibre | $0,38 - x$ | $0,38 - x$ | x | x |

Soit $Q_{r,eq} = K = 3,7 = \frac{x^2}{(0,38 - x)^2}$.

En développant : $3,7 = \frac{x^2}{0,1444 - 0,76x + x^2}$

soit $2,7x^2 - 2,812x + 0,53428 = 0$.

Le discriminant est : $\Delta = (2,812)^2 - 4 \times 2,7 \times 0,53428 = 2,137$.

Les deux solutions sont : $x_1 = \frac{2,812 + \sqrt{2,137}}{2 \times 2,7} = 0,791$

et $x_2 = \frac{2,812 - \sqrt{2,137}}{2 \times 2,7} = 0,250$.

Seule la solution x_2 a un sens en chimie car $x < 0,38$ donc :

$x_{eq} = 0,250$ mol.

b. À l'instant $t_1 = 10$ min, la valeur de l'avancement x de la réaction est $x = 0,125$ mol.

| Équation de la réaction | $A (\ell) + B (\ell) \rightleftharpoons E (\ell) + H_2O (\ell)$ | | | |
|-------------------------|---|------------------------|--------|-----------|
| | Quantités de matière (mmol) | | | |
| État du système | $n(A)$ | $n(B)$ | $n(E)$ | $n(H_2O)$ |
| État à t_1 | $0,38 - 0,125 = 0,255$ | $0,38 - 0,125 = 0,255$ | 0,125 | 0,125 |

$Q_{r,t_1} = \frac{0,125 \times 0,125}{0,255 \times 0,255} = 0,24 < K$.

c. $Q_{r,t_1} < K$: le système n'a pas atteint l'état d'équilibre. Le système évolue dans le sens direct de l'équation de réaction.

d. À la date t_1 , l'avancement est égal à la moitié de l'avancement maximal. On parle de temps de demi-réaction.

6. Pour augmenter le rendement de la synthèse, l'expérimentateur peut :

- éliminer un produit au cours de sa formation par distillation ou utilisation d'un montage Dean-Stark ;
- mettre un réactif en excès par rapport à l'autre.

11

Mouvement et deuxième loi de Newton

Programme officiel

Mouvement et interactions

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

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

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

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

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

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

Vu en première

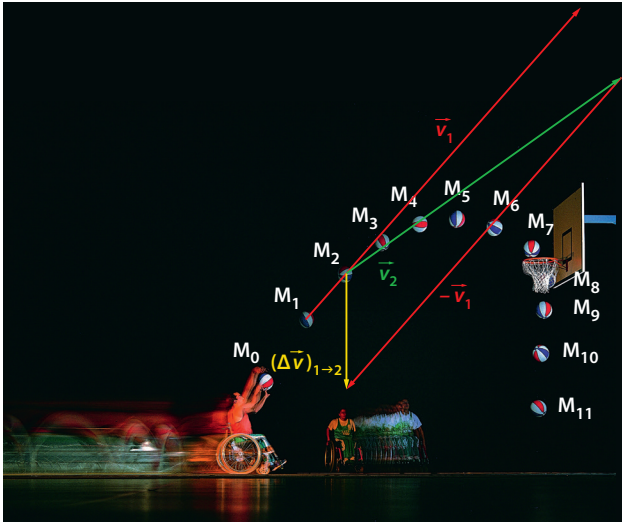
Le mouvement d'un système

p. 218

Réactiver ses connaissances

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

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



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

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

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

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

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

Flash test

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

Activité 1

expérimentale Accélération d'un système

p. 219

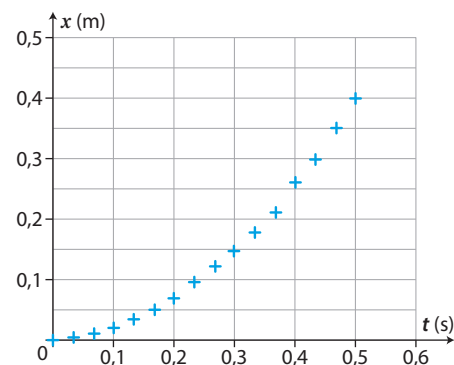
Capacités exigibles

- Réaliser et exploiter une vidéo pour déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les représentations des vecteurs vitesse et accélération.
- Collecter des données sur un mouvement (vidéo, chronophotographie, etc.).

Pratique expérimentale

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

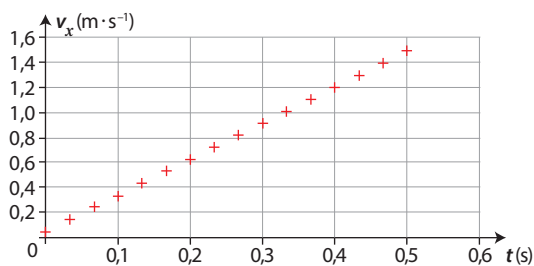
2 La récupération des données issues du pointage permet de tracer le graphique des variations de l'abscisse x du système en fonction du temps. On obtient une courbe similaire à celle du doc. B et reproduite ci-dessous :



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

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

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

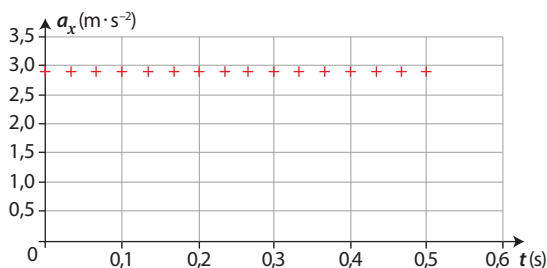


On note que v_x est une fonction linéaire (l'ordonnée à l'origine est quasiment nulle) du temps.

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

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

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



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

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

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

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

Un pas vers le cours

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

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

Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

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

Activité 2

documentaire Vecteur accélération lors d'un mouvement circulaire p. 220

Capacités exigibles

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

Analyse des documents

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

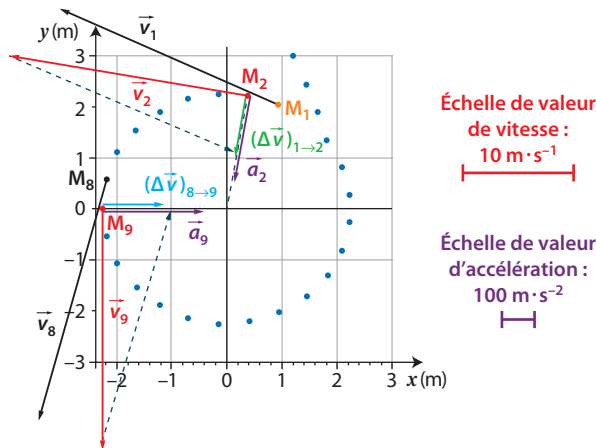
2 Pour construire le vecteur accélération du boulet en M_2 , il faut :
 – construire le vecteur vitesse \vec{v}_1 en M_1 ;
 – construire le vecteur vitesse \vec{v}_2 en M_2 ;
 – construire le vecteur variation de vitesse $(\Delta\vec{v})_{1 \rightarrow 2}$ en M_2 ;
 – construire le vecteur accélération \vec{a}_2 en M_2 .

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

Un pas vers le cours

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

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

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

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

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

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

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

Capsule vidéo de cours : Tracé d'un vecteur accélération

QCM

p. 225

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

Exercices

Appliquer le cours p. 228

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

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

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

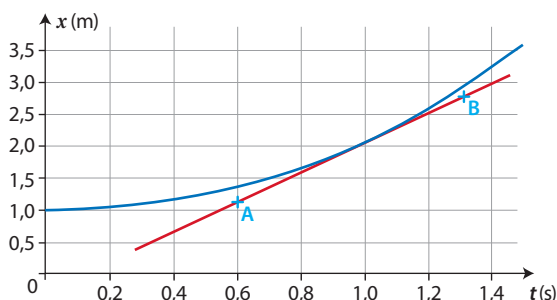
$$\text{Il vient } \vec{v} \begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = -a \\ v_y = \frac{dy}{dt} = 0 \end{cases}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

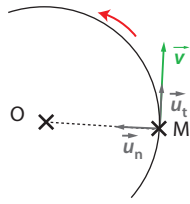
$$\vec{v} \begin{cases} v_x = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ v_y = -10t + 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$$

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

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

6 Étudier un mouvement circulaire

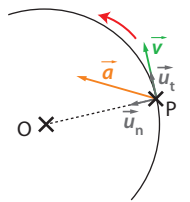
1. Le repère de Frenet est défini par :
- une origine mobile liée au point M étudié ;
 - un vecteur unitaire \vec{u}_n perpendiculaire en M à la trajectoire et orienté vers l'intérieur de la trajectoire ;
 - un vecteur unitaire \vec{u}_t tangent en M à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.



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

7 Exploiter la représentation d'un vecteur accélération

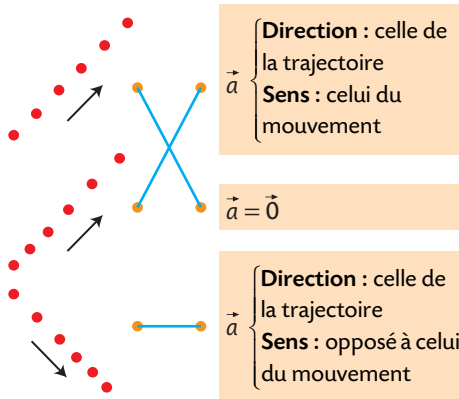
1. a. Le repère de Frenet est défini par :
- une origine mobile liée au point P ;
 - un vecteur unitaire \vec{u}_n perpendiculaire en P à la trajectoire et orienté vers l'intérieur de la trajectoire ;
 - un vecteur unitaire \vec{u}_t tangent en P à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.



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

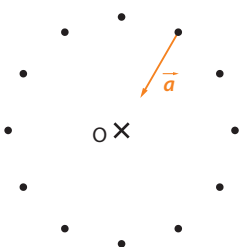
2. Le mouvement du point P est uniforme si $\frac{dv}{dt} = 0$. Cela est vérifié si la coordonnée du vecteur accélération suivant \vec{u}_t est nulle, l'accélération est alors suivant \vec{u}_n . Ici, le mouvement n'est pas uniforme car le vecteur accélération n'est pas « normal » à la trajectoire, c'est-à-dire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

8 Exploiter les caractéristiques du vecteur accélération (1)



9 Exploiter les caractéristiques du vecteur accélération (2)

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

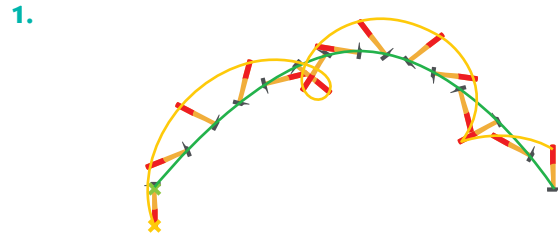


10 Tracer la trajectoire du centre de masse d'un système

- Le mobile est soumis à son poids \vec{P} et l'action de la table à coussins d'air \vec{R} . Comme les frottements sont négligés, ces deux forces se compensent : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au mobile $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}_G$ il vient donc $m \vec{a}_G = \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$. Il vient $\vec{a} = \vec{0}$, le vecteur vitesse du mobile est constant. Dans le référentiel galiléen considéré, le mouvement du centre de masse G du mobile est rectiligne uniforme.



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



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

12 Appliquer la deuxième loi de Newton (1)

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

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

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

13 Appliquer la deuxième loi de Newton (2)

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

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

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

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

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

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

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

Application numérique :

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

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

14 Le point sur les vecteurs

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

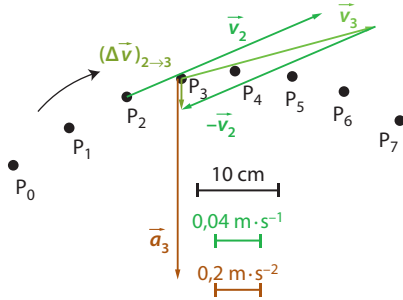
Graphiquement, on mesure $P_2P_3 = 7,3 \text{ cm}$ et $P_3P_4 = 6,8 \text{ cm}$.

Il vient donc $v_2 = 0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_3 = 0,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. Pour construire en P_3 le vecteur variation de vitesse $(\Delta \vec{v})_{2 \rightarrow 3}$:

- reporter le vecteur $-\vec{v}_2$ à l'extrémité de \vec{v}_3 ;
- construire le vecteur qui a pour origine \vec{v}_3 et pour extrémité $-\vec{v}_2$.

L'échelle de représentation des vecteurs vitesse est précisée sur la construction ci-dessous.



3. On mesure sur la figure en tenant compte de l'échelle $(\Delta v)_{2 \rightarrow 3} = 0,034 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La valeur du vecteur \vec{a}_3 est donnée par $a_3 = \frac{(\Delta v)_{2 \rightarrow 3}}{\Delta t}$.

Application numérique :

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

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

15 Ion acceleration

Traduction : Accélération d'un ion

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

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

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

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

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

Réponses

1. La valeur de la force électrostatique est :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

16 Connaitre les critères de réussite
Virage d'un avion

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

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

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

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

Le vecteur accélération est donc :

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

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

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

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

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

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

17 Saut au-dessus du canal de Corinthe

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



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

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

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

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

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

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

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

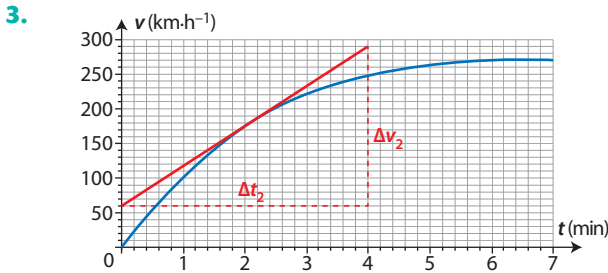
b. Lorsque la valeur de la vitesse verticale est nulle ($v_y = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), la seule coordonnée de la vitesse qui demeure est v_x . Le vecteur vitesse \vec{v} est horizontal ; il est tangent à la trajectoire à l'instant considéré qui est par conséquent le sommet de la parabole.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

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

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

18 Accélération d'un TGV

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



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

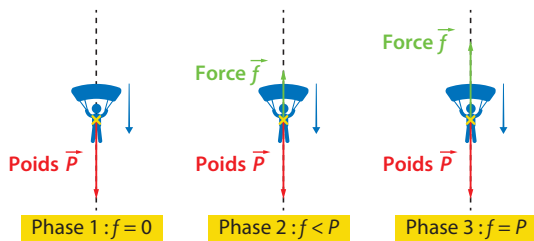
$$\text{À } t_2 = 2 \text{ min, } a_2 = \frac{\Delta v_2}{\Delta t_2} \text{ soit } a_2 = \frac{230 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{240 \text{ s}}$$

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

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

19 Accélération d'un parachutiste

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



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

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

- **Phase 2** : $\vec{P} + \vec{f} = m\vec{a}_G$ ou $m\vec{g} + \vec{f} = m\vec{a}_G$ soit $\vec{a}_G = \vec{g} + \frac{\vec{f}}{m}$.
La valeur de \vec{a}_G est obtenue en projetant les vecteurs sur l'axe (Oy) vertical descendant : $a_G = g - \frac{f}{m}$.
 $a_G = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} - \frac{300 \text{ N}}{80 \text{ kg}}$. Soit $a_G = 6,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

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

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

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

20 Le curling

- Dans un référentiel terrestre supposé galiléen, les forces appliquées au centre de masse G du système {pierre de curling} sont :

- **Phase 1** :
 - son poids \vec{P} ;
 - la réaction normale \vec{R} de la piste ;
 - la force \vec{F} exercée par la joueuse.



- **Phase 2** :
 - son poids \vec{P} ;
 - la réaction normale \vec{R} de la piste.



- Lors de la phase 2, le système se déplace avec une vitesse de valeur constante. La valeur de la vitesse de son centre de masse est donc donnée par la relation $v_G = \frac{d}{\Delta t_2}$ soit $v_G = \frac{20 \text{ m}}{10 \text{ s}}$.

La valeur v_G de la vitesse du centre de masse G du système lors de la phase 2 est $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- La valeur de l'accélération reste constante sur la phase 1, donc $a_G = \frac{\Delta v_G}{\Delta t_1}$.

La valeur v_G de la vitesse de la pierre de curling en fin phase 1 est égale à celle de sa vitesse en phase 2, soit $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\text{Ainsi } a_G = \frac{(2,0 - 0) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{4,0 \text{ s}}$$

La valeur a_G de l'accélération du centre de masse G du système lors de la phase 1 est $0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

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

$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m\vec{a}_G$. Le poids \vec{P} et la réaction \vec{R} se compensent, donc $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ d'où $\vec{F} = m\vec{a}_G$.

La projection des vecteurs sur un axe horizontal orienté dans le sens du mouvement du système conduit donc à $F = m \times a_G$.
 $F = 18 \text{ kg} \times 0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

La valeur F de la force exercée par la joueuse sur la pierre lors de la phase de lancer est $9,0 \text{ N}$.

21 Le mouvement de Vénus

- a. Le mouvement de Vénus est étudié dans le référentiel héliocentrique, supposé galiléen.

- b. L'orbite est quasi circulaire comme on peut le constater en traçant un cercle depuis le centre attracteur (Soleil), origine du repère.

Graphiquement, on vérifie bien que $R \approx 0,72 \text{ ua}$.

- a. Les vecteurs vitesse \vec{v}_2 et \vec{v}_3 sont tangents à la trajectoire, dirigés dans le sens du mouvement et de valeur $v_2 = v_3 = 34 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. On les représente par des segments fléchés $3,4$ fois plus longs que le segment d'échelle des valeurs de vitesse.

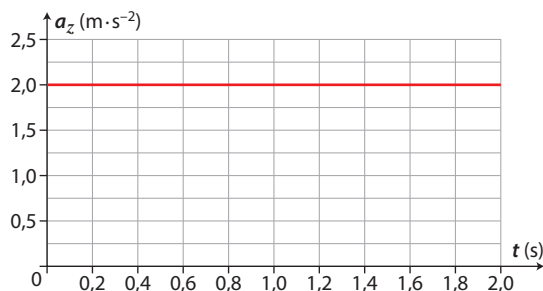
Dériver une fonction

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

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

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

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



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

23 À chacun son rythme

Vol d'une balle de golf

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

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

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

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

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

2. Deux forces agissent sur la balle :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

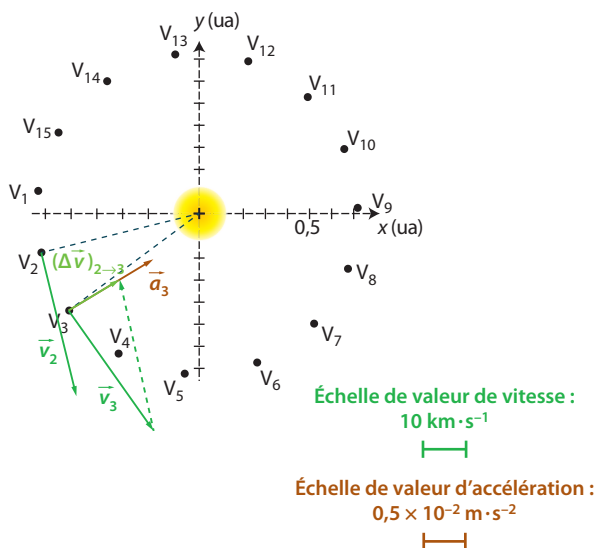
$$D = \frac{(76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \times \sin(2 \times 11^\circ)}{8,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} \text{ soit } D = 2,5 \times 10^2 \text{ m}.$$

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

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

La somme vectorielle des forces n'est pas nulle : le mouvement est accéléré, la trajectoire est alors parabolique mais la vitesse initiale est tellement grande que la toute première partie de la trajectoire est « tendue ». L'arc est alors assimilable à une droite

b. On construit en V_3 le vecteur variation de vitesse $(\Delta \vec{v})_{2 \rightarrow 3}$:
 - on reporte le vecteur $-\vec{v}_2$ à l'extrémité de \vec{v}_3 ;
 - on construit le vecteur qui a pour origine V_3 et pour extrémité $-\vec{v}_2$.



Sur la construction et en tenant compte de l'échelle, on mesure $(\Delta v)_{2 \rightarrow 3} = 14 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

La valeur de \vec{a}_3 est donnée par $a_3 = \frac{(\Delta v)_{2 \rightarrow 3}}{\Delta t}$.

$$a_3 = \frac{14 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{15 \times 24 \times 3600 \text{ s}} \text{ soit } a_3 = 1,1 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

On représente ce vecteur par un segment fléché 2,2 fois plus long que le segment d'échelle des valeurs d'accélération.

c. Le vecteur accélération \vec{a}_3 a même direction et même sens que le vecteur variation de vitesse $(\Delta \vec{v})_{2 \rightarrow 3}$ et pour valeur :

$$a_3 = 1,1 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Remarques

- Le vecteur accélération est pratiquement orienté vers le centre de la trajectoire. L'écart provient de l'approximation dans le calcul de l'accélération en V_3 qui est en fait une accélération moyenne entre V_2 et V_3 .
- Le mouvement de Vénus autour du Soleil étant presque circulaire uniforme, le vecteur accélération de Vénus n'a qu'une composante normale dans un repère de Frenet défini en chaque position. Sa

valeur en V_3 est donc donnée par la relation $a_3 = \frac{v_3^2}{R}$. On retrouve $a_3 = 1,1 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Il y a accord avec la détermination graphique.

3. a. La force gravitationnelle exercée par le Soleil sur Vénus a pour

expression : $\vec{F} = G \times \frac{m_s \times m_v}{R^2} \vec{u}_{v \rightarrow s}$ où $\vec{u}_{v \rightarrow s}$ est un vecteur unitaire dirigé suivant la droite (VS) et orienté vers le centre du Soleil.

b. D'après la deuxième loi de Newton appliquée à Vénus dans le référentiel héliocentrique supposé galiléen $\sum \vec{F} = m_v \vec{a}$.

En admettant que la force gravitationnelle exercée par le Soleil est la seule force qui s'exerce sur Vénus, il vient :

$$G \times \frac{m_s \times m_v}{R^2} \vec{u}_{v \rightarrow s} = m_v \vec{a}, \text{ soit } \vec{a} = G \times \frac{m_s}{R^2} \vec{u}_{v \rightarrow s}.$$

La valeur de l'accélération est $a = G \times \frac{m_s}{R^2}$.

$$a = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times \frac{2,0 \times 10^{30} \text{ kg}}{(0,72 \times 1,5 \times 10^{11} \text{ m})^2}$$

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

c. La valeur obtenue par construction est en accord avec celle déterminée à partir de la deuxième loi de Newton. Ainsi, la deuxième loi de Newton est vérifiée, le référentiel d'étude peut donc être considéré comme galiléen.

qui est parcouru à vitesse de valeur quasi constante (elle décroît cependant tout au long de l'ascension de la balle).

24 Python

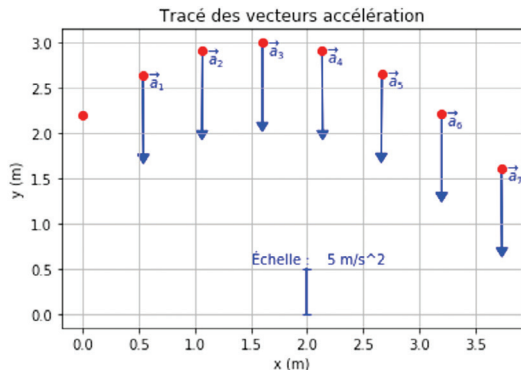
Vecteur accélération

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

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

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

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



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

– direction : verticale ;

– sens : vers le bas ;

– valeur : $a = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

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

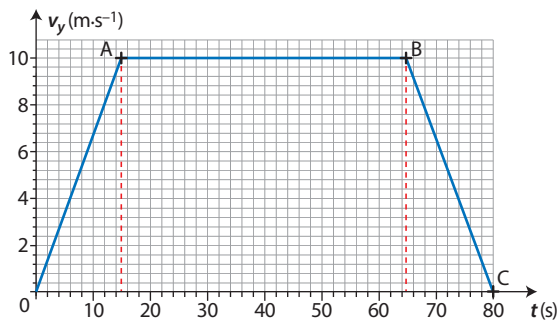
5. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système dans un référentiel terrestre supposé galiléen, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$.

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

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

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

25 La cabine d'ascenseur



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

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

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

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

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

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

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

– \vec{R} , l'action du support (plancher de la cabine) ;

– \vec{P} , le poids de la personne.

Ces forces ont même direction mais sont de sens opposés.

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

• **Première phase :**

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

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

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

• **Deuxième phase :**

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

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

• **Troisième phase :**

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

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

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

c. • **Première phase :**

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

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

• **Deuxième phase :**

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

• **Troisième phase :**

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

26 L'expérience de Millikan

1. $\vec{F} = q\vec{E}$.

$q < 0$, donc \vec{F} et \vec{E} sont deux vecteurs colinéaires et de sens opposés. La force électrique est donc verticale et orientée vers le haut.

2. Dans un référentiel terrestre supposé galiléen, le système {gouttelette} à l'équilibre est soumise à deux forces, son poids \vec{P} , force verticale orientée vers le bas et la force électrique \vec{F} .

3. La gouttelette est en équilibre, donc son accélération est égale au vecteur nul : $\vec{a} = \vec{0}$.

4. D'après la deuxième loi de Newton appliquée à la gouttelette, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ avec m la masse de la gouttelette et $\vec{a} = \vec{0}$.

Il vient $\sum \vec{F} = \vec{0}$.

On en déduit : $\vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$.

On projette les vecteurs force sur un axe vertical dirigé vers le bas : $P - F = 0$ soit $P = F$.

$$\text{Il vient donc } m \times g = |q| \times E \text{ soit } |q| = \frac{m \times g}{E}.$$

Or $m = \rho \times V = \frac{4}{3} \rho \times \pi \times r^3$, on obtient finalement :

$$|q| = \frac{4 \times \rho \times \pi \times r^3 \times g}{3E}.$$

$$|q| = \frac{4 \times 890 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times \pi \times (2,0 \times 10^{-6} \text{ m})^3 \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{3 \times 1,83 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}}$$

$$|q| = 1,6 \times 10^{-18} \text{ C}.$$

5. La charge q est due à un excès de 10 électrons :

$$|q| = 10e \text{ donc } e = \frac{|q|}{10} \text{ soit } e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}.$$

27 Chute dans un fluide

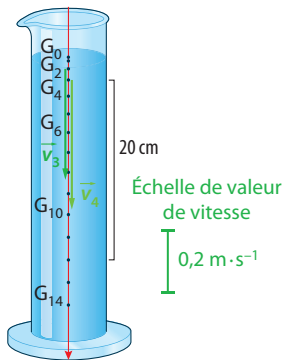
1. La valeur de la vitesse en G_3 est donnée par $v_3 = \frac{G_3 G_4}{\Delta t}$

$$\text{et en } G_4 \text{ par } v_4 = \frac{G_4 G_5}{\Delta t}.$$

Graphiquement, et en utilisant l'échelle fournie, on mesure : $G_3 G_4 = 1,8 \text{ cm}$ et $G_4 G_5 = 2,1 \text{ cm}$.

$$v_3 = \frac{1,8 \times 10^{-2} \text{ m}}{0,050 \text{ s}} = 0,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$v_4 = \frac{2,1 \times 10^{-2} \text{ m}}{0,050 \text{ s}} = 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$



2. Pour construire en G_4 le vecteur accélération \vec{a}_4 , on construit dans un premier temps le vecteur variation de vitesse $(\Delta\vec{v})_{3\rightarrow4}$. Pour cela :

- reporter le vecteur $-\vec{v}_3$ à l'extrémité de \vec{v}_4 ;
- construire le vecteur qui a pour origine G_4 et pour extrémité $-\vec{v}_3$.

On mesure sur la figure en tenant compte de l'échelle :

$$(\Delta v)_{3\rightarrow4} = 0,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur du vecteur \vec{a}_4 est donnée par $a_4 = \frac{(\Delta v)_{3\rightarrow4}}{\Delta t}$.

$$a_4 = \frac{0,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0,050 \text{ s}} \text{ soit } a_4 = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Ce vecteur sera représenté par un segment fléché vertical et orienté vers le bas, 2 fois plus long que le segment d'échelle des valeurs d'accélération.

3. Valeur de la poussée d'Archimède :

$$F_p = \rho_{\text{fluide}} \times g \times V.$$

$$F_p = 1\,240 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 2,10 \times 10^{-6} \text{ m}^3.$$

$$\text{Soit } F_p = 2,55 \times 10^{-2} \text{ N}.$$

Valeur du poids : $P = m \times g$.

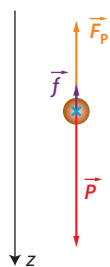
$$P = 3,80 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

$$\text{Soit } P = 3,73 \times 10^{-2} \text{ N}.$$

La valeur du poids est supérieure à celle de la poussée d'Archimède, donc le système ne flotte pas, mais les deux forces sont du même ordre de grandeur. La poussée d'Archimède n'est pas négligeable.

4. Dans un référentiel terrestre galiléen, les forces appliquées au système {bille} sont :

- son poids \vec{P} ;
- la poussée d'Archimède \vec{F}_p ;
- les forces de frottements du fluide \vec{f} .



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

$$\text{Soit } \vec{P} + \vec{f} + \vec{F}_p = m\vec{a}.$$

On projette les vecteurs force sur un axe vertical orienté vers le bas. On obtient alors : $P - f - F_p = m \times a$.

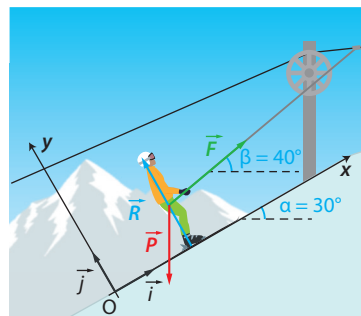
$$f = P - F_p - m \times a.$$

$$\text{On obtient } f = 7,2 \times 10^{-3} \text{ N}.$$

28 Le téléski

1. Les forces agissant sur le système {skieuse} sont :

- son poids \vec{P} ;
- la réaction normale du support \vec{R} ;
- la force de traction exercée par la perche \vec{F} .



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

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

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

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

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

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

Par projection sur chacun des axes du repère $(O ; \vec{i}, \vec{j})$: $P_x + R_x + F_x = 0$ et $P_y + R_y + F_y = 0$.

Il vient :

$$0 - m \times g \times \sin \alpha + 0 + F \times \cos(\beta - \alpha) = 0$$

$$-m \times g \times \cos \alpha + R + F \times \sin(\beta - \alpha) = 0 .$$

De la première égalité, on peut écrire :

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

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

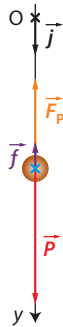
$$\text{soit } F = 3,0 \times 10^2 \text{ N}.$$

Préparation à l'écrit

29 **Le thermomètre de Galilée**

Partie I

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



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

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

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

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

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

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

Par simplification, on obtient :

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

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

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

3. Applications numériques :

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

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

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

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

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

Partie II

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

Complément

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

2. On a obtenu comme expression de la valeur de l'accélération :

$$a_G = A - B \times v_G.$$

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

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

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

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

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

30 **Un ascenseur à bateaux**

Partie I

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

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

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

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

Partie II

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

Le pointage permet de déterminer la valeur de la vitesse.

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

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

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

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

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

Préparation à l'ECE

1. Le pointage montre qu'au bout de 3,2 s environ, les espaces parcourus à intervalles de temps réguliers restent constants. Le mouvement est alors uniforme, la bille atteint donc une vitesse limite de valeur v_ℓ constante.

2. Avec l'échelle mentionnée, on mesure pour les trois derniers intervalles de temps une distance parcourue $d = 0,20 \text{ m}$.

$$\text{On a donc} \quad v_\ell = \frac{d}{3\tau} \quad \text{donc} \quad v_\ell = \frac{0,20 \text{ m}}{3 \times 0,400 \text{ s}} \quad \text{soit} \quad v_\ell = 0,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. La bille est soumise :

- à son poids \vec{P} ;
- à la poussée d'Archimède \vec{F}_p ;
- à la force de frottement \vec{f} .

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

On projette les vecteurs force sur l'axe vertical (Oz) orienté vers le bas. On obtient alors : $P - f - F_p = m \times a$.

En remplaçant les valeurs des forces par leur expression, on obtient : $m \times g - 6\pi \times \eta \times R \times v - \rho \times g \times V = m \times a$

$$\text{Or} \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

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

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

On en déduit :

$$m \times g - 6\pi \times \eta \times R \times v_\ell - \rho \times g \times V = 0$$

$$\text{et donc } \eta = \frac{(m - \rho \times V) \times g}{6\pi \times R \times v_\ell}.$$

$$\eta = \frac{(35,5 \times 10^{-3} \text{ kg} - 920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 33,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{6\pi \times 2,00 \times 10^{-2} \text{ m} \times 0,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$$

$$\eta = 0,72 \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

Aux incertitudes de mesure près sur la valeur de la vitesse limite, on peut conclure que l'huile utilisée est de l'huile de type 3.

Vers l'oral

p. 236

Je m'exprime à l'oral sur

La description d'un mouvement et la deuxième loi de Newton

- **Citer les deux premières lois de Newton.**

D'après la première loi de Newton, encore appelée principe d'inertie, si les forces appliquées à un système se compensent alors le mouvement du système est rectiligne et uniforme. Ce qui se traduit par $\sum \vec{F} = \vec{0}$ alors $\vec{v}_G = \text{cste}$.

D'après la deuxième loi de Newton, dans un référentiel galiléen, la somme des forces $\sum \vec{F}$ 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. Soit $\sum \vec{F} = m\vec{a}_G$.

- **Écrire le vecteur accélération dans un repère de Frénet.**

Dans le repère de Frénet, 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.

- **Quel est l'intérêt de définir le 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. En pratique, l'étude du mouvement du centre de masse G est plus simple que celui d'un point quelconque du système.

12

Mouvement dans un champ uniforme

Programme officiel

Mouvement et interactions

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

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

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

| | | |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Énergie cinétique. • Travail d'une force. • Théorème de l'énergie cinétique. • Énergie potentielle. Cas du champ de pesanteur terrestre. • Forces non-conservatives : exemple des frottements. • Énergie mécanique. • Conservation et non conservation de l'énergie mécanique. • Gain ou dissipation d'énergie. | <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel. • Utiliser l'expression du travail $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}$ dans le cas de forces constantes. • Énoncer et exploiter le théorème de l'énergie cinétique. • Établir et utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur pour un système au voisinage de la surface de la Terre. • Calculer le travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne. • Identifier des situations de conservation et de non conservation de l'énergie mécanique. • Exploiter la conservation de l'énergie mécanique dans des cas simples : chute libre en l'absence de frottement, oscillations d'un pendule en l'absence de frottement, etc. • Utiliser la variation de l'énergie mécanique pour déterminer le travail des forces non conservatives. | <p> $\mathcal{E}_c \text{ en J} \rightarrow \mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m \times v^2$ (m en kg, v en m·s⁻¹) $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \times AB \times \cos \alpha$ (F en N, AB en m, sans unité) $\Delta \mathcal{E}_{cA \rightarrow B} = \mathcal{E}_{cB} - \mathcal{E}_{cA} = \sum_i W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_i)$ (W en J) $\mathcal{E}_p \text{ en J} \rightarrow \mathcal{E}_p = m \times g \times z$ (m en kg, g en N·kg⁻¹, z en m) $W \text{ en J} \rightarrow W_{A \rightarrow B}(\vec{f}) = -f \times AB$ (f en N, AB en m) $\Delta \mathcal{E}_{m_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{m_B} - \mathcal{E}_{m_A} = 0 \text{ J}$ $\Delta \mathcal{E}_{m_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{m_B} - \mathcal{E}_{m_A} = \sum_i W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_{NC,i})$ </p> |
|--|--|---|

Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

Il pourra être utile de faire remarquer aux élèves que g peut s'exprimer indifféremment en N·kg⁻¹ ou en m·s⁻².

Vu en première

Champs, forces et théorème de l'énergie cinétique p. 238

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo : Théorème de l'énergie cinétique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Flash test

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

Activité 1

Expérimentale Mouvement dans un champ de pesanteur p. 239

Capacités exigibles

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

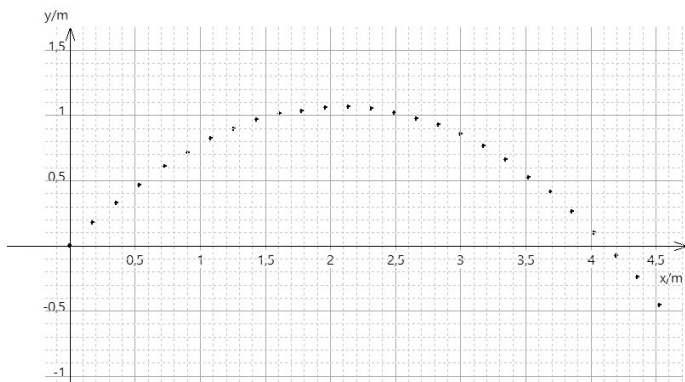
Pratique expérimentale

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

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

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

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



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

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

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

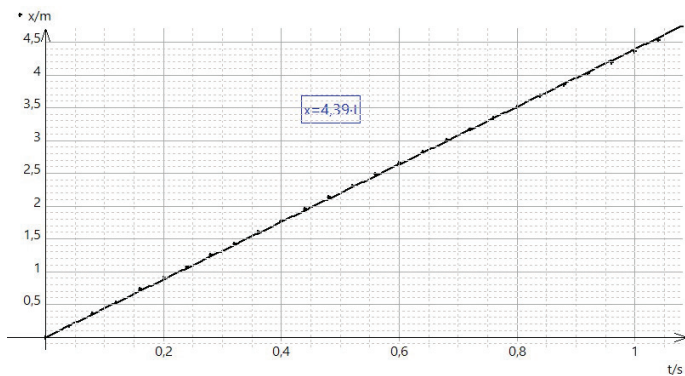
$$v_0 = \sqrt{(4,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 + (4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2} \text{ soit } v_0 = 6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} .$$

• Pour déterminer l'angle α du lancer, on détermine :

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

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

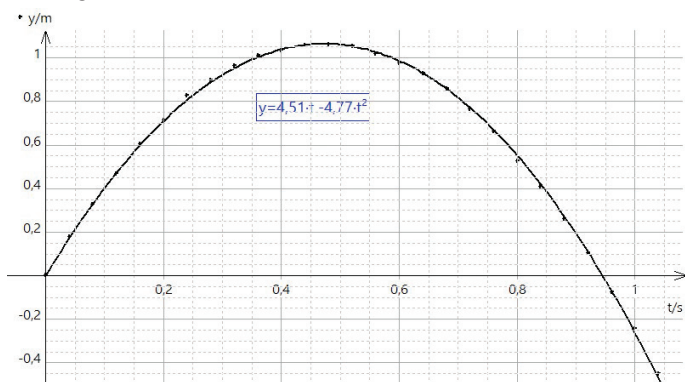
c. On constate que la coordonnée $x=f(t)$ du point M suivant l'axe des abscisses est une fonction linéaire du temps. Le graphique obtenu à partir du pointage réalisé est le suivant :



Or, on a dans le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE :

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

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



Or, on a dans le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE :

$y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t$ où g , v_0 et α sont des constantes, donc $y = f(t)$ est une fonction polynôme de degré deux.

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

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

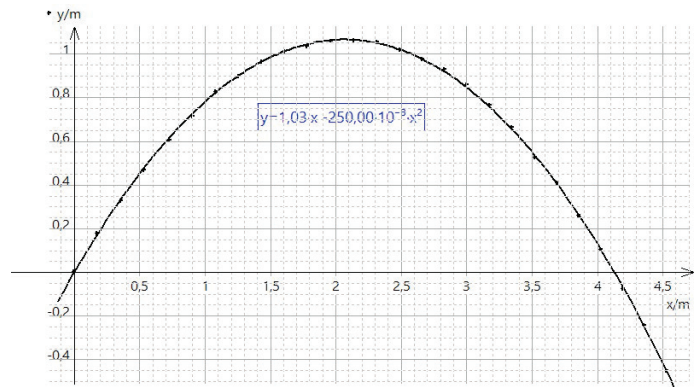
On remplace t dans l'expression $y = -\frac{1}{2}g \times t^2 + v_0 \times \sin \alpha \times t$.

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

L'équation de la trajectoire du système est donc :

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

Avec le pointage réalisé, on obtient :



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

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

Il faut donc résoudre l'équation :

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

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

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

La solution négative n'a pas de sens physique.

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

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

Un pas vers le cours

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

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

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

Activité 2

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

p. 240

Capacités exigibles

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

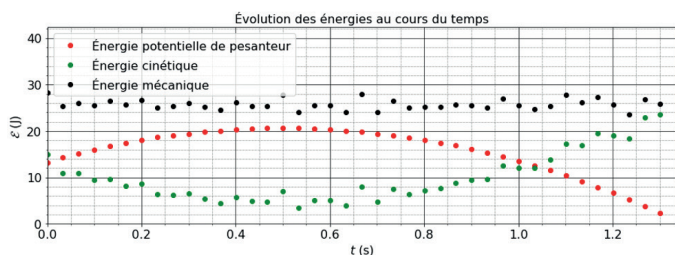
Simulation numérique

Ressources pour le professeur à télécharger :

- Fichier Python
- Explications du programme en langage Python

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

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



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

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

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

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

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

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

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

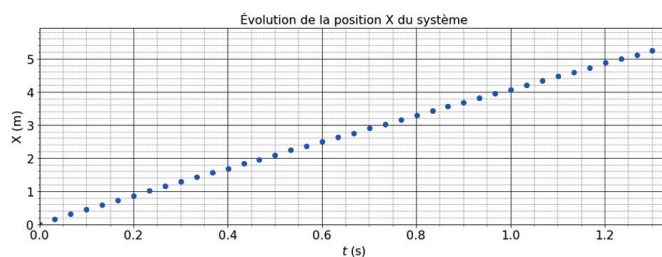
La valeur de la vitesse de la boule de pétanque lorsqu'elle touche le sol est $8,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

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

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

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

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



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

Un pas vers le cours

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

Activité 3

documentaire Accélération de particules chargées

p. 241

Capacités exigibles

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

- Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées.
- Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme.

Analyse des documents

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

Comme $\vec{F} = -e\vec{E}$ avec $-e < 0$, il vient que le champ électrique est colinéaire et de sens opposé à la force électrique. Les champs électriques sont donc horizontaux orientés vers la gauche.

b. La charge du tube dont l'électron sort est négative, et celle du tube vers lequel il se dirige est positive, car le champ électrique \vec{E} est orienté dans le sens des potentiels décroissants (d'une plaque chargée positivement vers une plaque chargée négativement).

2 a. $F = |-e| \times E = |-e| \times U_{AB} \times \frac{1}{d}$ et donc $F = e \times \frac{|U_{AB}|}{d}$.

b. La seule force qui s'applique sur l'électron est la force électrique \vec{F} . D'après le théorème de l'énergie cinétique,

$$\mathcal{E}_{cA \rightarrow B} = \mathcal{E}_{cB} - \mathcal{E}_{cA} = W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$$

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

Avec $v_A = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, il vient $\frac{1}{2} m_e \times v_B^2 = -e \times U_{AB}$.

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

L'application numérique, non demandée dans la question de l'activité, conduirait à :

$$v_B = \sqrt{\frac{2 \times (-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (-1,0 \times 10^3 \text{ V})}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

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

3 L'accélération avec un seul condensateur plan nécessiterait une tension électrique très élevée entre les deux plaques du condensateur d'accélération, donc une installation électrique plus dangereuse.

Un pas vers le cours

4 Un accélérateur linéaire permet d'accélérer en ligne droite des particules électriquement chargées.

Cette accélération est la conséquence de l'existence d'un champ électrique uniforme ayant :

- pour direction, celle de l'axe de l'accélérateur ;
- pour sens celui de l'entrée vers la sortie si la charge électrique est positive, le sens contraire si la charge électrique est négative.

Capsule vidéo de cours : Mouvement dans un champ uniforme

QCM

p. 247

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

Exercices

Appliquer le cours p. 250

2 Reconnaître un champ vectoriel uniforme (1)

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

3 Reconnaître un champ vectoriel uniforme (2)

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

4 Caractériser le champ de pesanteur terrestre (1)

1. Le champ de pesanteur terrestre en un point M de la surface de la Terre est orienté de M vers le centre de la Terre. Cela se traduit localement par la verticale passant par M et orientée vers le bas.
2. Dans une région de l'espace de faibles dimensions, ce champ garde les mêmes direction, sens et valeur. Il est donc uniforme.

5 Caractériser le champ de pesanteur terrestre (2)

Si on assimile le champ de pesanteur \vec{g} au champ gravitationnel

$$\vec{G}, \text{ on a } g = G = G \times \frac{M_T}{R_T^2}.$$

$$g = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times \frac{5,97 \times 10^{24} \text{ kg}}{(6\,378 \times 10^3)^2 \text{ m}^2}$$

$$g = 9,79 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 9,79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

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

1. D'après l'expression de E fournie, $|U_{AB}| = E \times d$.

$$|U_{AB}| = 1,0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1} \times 10,0 \times 10^{-2} \text{ m}.$$

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

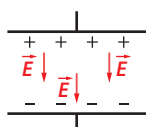
2. La valeur E du champ électrique est inversement proportionnelle à la distance d entre les armatures. Lorsque d augmente, E diminue.

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

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

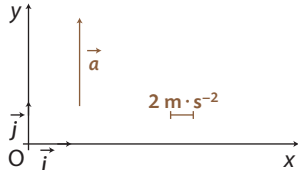
$$\text{Sa valeur est } E = \frac{|U|}{d} = \frac{10 \times 10^3 \text{ V}}{20,0 \times 10^{-2} \text{ m}} = 5,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}.$$

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



8 Représenter un vecteur accélération

1. Le vecteur accélération est vertical, et sa longueur est égale à 3,9 fois celle du segment d'échelle.



2. La valeur de l'accélération est $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ avec $a_x = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, il vient $a = |a_y| = 7,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

9 Déterminer les coordonnées d'un vecteur accélération

1. Les coordonnées du vecteur accélération dans le repère orthonormé $(O; \vec{i}, \vec{j})$ sont :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \\ a_y = -1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$$

2. L'accélération a pour valeur $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$;

$$a = \sqrt{(2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})^2 + (-1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})^2}$$

$$a = 2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

10 Exprimer le vecteur accélération (1)

1. Le système étudié est le centre de masse d'une bille dans un référentiel galiléen. La bille n'est soumise qu'à son poids \vec{P} .

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

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

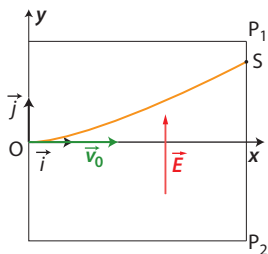
$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$$

11 Exprimer le vecteur accélération (2)

1. On constate sur la figure que le positon est dévié vers le haut. La force électrique \vec{F} , perpendiculaire aux plaques P_1 et P_2 doit donc être orientée vers le haut, soit de P_2 vers P_1 .

La force et le champ électriques sont liés par la relation $\vec{F} = q\vec{E}$. Dans la situation étudiée, $q = +e$ avec $e > 0$.

Les vecteurs \vec{F} et \vec{E} sont donc colinéaires et de même sens.



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

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

Comme $\frac{e}{m} > 0$, les vecteurs accélération \vec{a} et champ électrique

\vec{E} sont colinéaires et de même sens.

Les coordonnées du vecteur accélération sont :

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

12 Exprimer les conditions initiales

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

2. Le vecteur position initiale a pour coordonnées :

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

Le vecteur vitesse initiale a pour coordonnées :

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

13 Identifier les conditions initiales

Les schémas **a** et **c** ne correspondant pas aux conditions initiales du vecteur position, on peut les éliminer.

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

14 Exprimer le vecteur vitesse

1. Il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération puis utiliser les conditions initiales indiquées.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ donc } \vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = 6,2t + C_y \\ v_z = C_z \end{cases}$$

$$\text{De plus, } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = C_x \\ v_{y_0} = 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 6,2 \times 0 + C_y \\ v_{z_0} = 7,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = C_z \end{cases}$$

$$\text{Il vient } \begin{cases} C_x = 0 \\ 6,2 \times 0 + C_y = 5,0 \\ C_z = 7,8 \end{cases} \text{ d'où } \begin{cases} C_x = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ C_y = 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ C_z = 7,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse exprimée en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ s'écrivent :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = 0 \\ v_y = 6,2t + 5,0 \\ v_z = 7,8 \end{cases}$$

2. Le vecteur vitesse possède 2 coordonnées dans le plan (Oxy) ; l'accélération n'a pas de coordonnée suivant (Oz) . La trajectoire est dans le plan qui contient à la fois \vec{v} et \vec{a} .

15 Exprimer le vecteur position

1. À l'instant initial, le centre de masse P de la boule de pétanque coïncide avec l'origine du repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$ donc :

$$\overline{OP_0} \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 0 \text{ m} \end{cases}$$

2. Il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur vitesse puis utiliser les conditions initiales indiquées.

$$\vec{v} = \frac{d\overline{OP}}{dt} \text{ donc } \overline{OP} \begin{cases} x = 6,0t + D_x \\ y = -\frac{1}{2} \times 9,81t^2 - 6,0t + D_y \end{cases}$$

Comme $\overline{OP_0} \begin{cases} x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 0 \text{ m} \end{cases}$, il vient :

$$\begin{cases} 6,0 \times 0 + D_x = 0 \\ -4,9 \times 0^2 - 6,0 \times 0 + D_y = 0 \end{cases} \text{ d'où } \begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = 0 \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur position exprimées en mètre s'écrivent :

$$\overline{OP} \begin{cases} x = 6,0t \\ y = -4,9t^2 - 6,0t \end{cases}$$

16 Établir l'équation de la trajectoire

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

On remplace t dans l'autre équation horaire :

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

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

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

17 Identifier l'équation d'une trajectoire

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

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

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

Seule l'équation (b) respecte cette condition initiale.

18 Établir les équations horaires (1)

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

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

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

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

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

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

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

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

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

Les équations horaires du mouvement du ballon s'écrivent :

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

19 Établir les équations horaires (2)

1. Coordonnées cartésiennes du vecteur position à $t = 0$ s :

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

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

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

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

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

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

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

3. Comme $\frac{e}{m} > 0$, les vecteurs accélération \vec{a} et champ électrique

\vec{E} sont colinéaires et de même sens.

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération s'écrivent :

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

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

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

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

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

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

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

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

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

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

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

Les équations horaires du mouvement du positon s'écrivent :

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

20 Appliquer la conservation de l'énergie (1)

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

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

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

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

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

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

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

21 Appliquer la conservation de l'énergie (2)

1. Si on considère que la balle n'est soumise qu'à son poids, force conservative, son énergie mécanique doit être constante au cours du mouvement, c'est ce que l'on vérifie aux erreurs expérimentales près.

2. L'énergie potentielle de pesanteur est nulle au niveau du sol. On lit graphiquement une énergie potentielle de pesanteur initiale $\mathcal{E}_{p_0} = 0,60 \text{ J}$.

Or $\mathcal{E}_{p_0} = m \times g \times h_0$ avec h_0 la hauteur initiale de la balle.

$$\text{Il vient } h_0 = \frac{\mathcal{E}_{p_0}}{m \times g}.$$

$$\text{Donc } h_0 = \frac{0,60 \text{ J}}{25 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} \text{ soit } h_0 = 2,4 \text{ m}.$$

La hauteur initiale de la balle est $2,4 \text{ m}$.

3. À l'instant initial, on a $\mathcal{E}_{m_0} = \mathcal{E}_{c_0} + \mathcal{E}_{p_0}$

L'énergie cinétique de la balle a donc pour expression :

$$\mathcal{E}_{c_0} = \mathcal{E}_{m_0} - \mathcal{E}_{p_0}.$$

L'énergie mécanique est égale à $1,1 \text{ J}$ environ.

$$\mathcal{E}_{c_0} = 1,1 \text{ J} - 0,60 \text{ J} = 0,5 \text{ J}.$$

L'énergie cinétique initiale de la balle est $0,5 \text{ J}$.

22 Utiliser les équations horaires (1)

1. Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse à $t = 0 \text{ s}$ s'écrivent :

$$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \cos(50^\circ) \\ v_{y_0} = -9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 0 \text{ s} + 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \sin(50^\circ) \end{cases}$$

$$\text{soit } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \cos(50^\circ) \\ v_{y_0} = 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \sin(50^\circ) \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur position à $t = 0 \text{ s}$ s'écrivent :

$$\overrightarrow{OG_0} \begin{cases} x_0 = 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \cos(50^\circ) \times 0 \text{ s} \\ y_0 = -\frac{1}{2} \times 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 0^2 \text{ s}^2 + 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \sin(50^\circ) \times 0 \text{ s} \end{cases}$$

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

2. Le vecteur vitesse est horizontal lorsque sa coordonnées verticale v_y est nulle : $0 = -9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times t_s + 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \sin(50^\circ)$.

$$\text{D'où } t_s = \frac{-5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \sin(50^\circ)}{-9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} \text{ soit } t_s = 0,39 \text{ s}.$$

Le vecteur vitesse est horizontal à la date $t_s = 0,39 \text{ s}$.

3. À cette date, la coordonnée verticale de G est :

$$y(t_s) = -\frac{1}{2} \times 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times t_s^2 + 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \sin(50^\circ) \times t_s$$

$$y(t_s) = -\frac{1}{2} \times 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 0,39^2 \text{ s}^2 + 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \sin(50^\circ) \times 0,39 \text{ s}$$

$$y(t_s) = 0,75 \text{ m}.$$

23 Utiliser les équations horaires (2)

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

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

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

C'est l'équation cartésienne de la trajectoire du cation.

2. Lorsque le cation a parcouru la distance horizontale d , alors

$$x = d. \text{ Il vient } y_s = \frac{e \times E}{m \times v_0^2} \times d^2.$$

24 Utiliser le théorème de l'énergie cinétique (1)

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

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

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

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

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

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

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

2. La valeur de la vitesse v_B est proportionnelle à $\sqrt{|U_{AB}|}$.

v_B augmente donc lorsque la valeur absolue de la tension appliquée entre les plaques augmente.

25 Utiliser le théorème de l'énergie cinétique (2)

1. La variation de l'énergie cinétique du système {un ion magnésium} entre A et B s'exprime par :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = \mathcal{E}_{c_B} - \mathcal{E}_{c_A} = \frac{1}{2} m_{Mg^{2+}} \times v_B^2 - \frac{1}{2} m_{Mg^{2+}} \times v_A^2$$

Comme la valeur de la vitesse v_A est négligeable, la relation devient :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = \frac{1}{2} m_{Mg^{2+}} \times v_B^2.$$

2. Dans un référentiel terrestre considéré galiléen et d'après le théorème de l'énergie cinétique : $\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = \sum_i W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_i)$.

Comme le poids de l'ion est négligeable devant la force électrique, la relation précédente devient :

$$\Delta \mathcal{E}_{c_{A \rightarrow B}} = W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) \text{ soit } \frac{1}{2} m_{Mg^{2+}} \times v_B^2 = q \times U = 2e \times U.$$

$$\text{Il vient } m_{Mg^{2+}} = \frac{4e \times U}{v_B^2}.$$

$$\text{D'où } m_{Mg^{2+}} = \frac{4 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 20 \times 10^3 \text{ V}}{(5,61 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}$$

$$\text{soit } m_{Mg^{2+}} = 4,1 \times 10^{-26} \text{ kg}.$$

26 Vrai/Faux

1. Affirmation exacte.

Justification : la deuxième loi de Newton appliquée au projectile permet d'écrire que $\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$.

Ici $\sum \vec{F} = \vec{P}$ d'où $\vec{a} = \vec{g}$. L'accélération est constante au cours du mouvement et ne dépend pas des conditions initiales.

2. Affirmation exacte.

Justification : on montre que les vecteurs vitesse et position ont des coordonnées nulles suivant l'axe (Oz). On en déduit que le mouvement se fait dans le plan contenant le vecteur vitesse initiale, soit le plan (O ; x, y).

3. Affirmation fausse.

Justification : le mouvement est rectiligne vertical si $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$.

4. Affirmation exacte.

Justification : on montre que l'équation de la trajectoire s'écrit :

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

La vitesse initiale étant horizontale, $\alpha = 0^\circ$.

L'équation de la trajectoire devient : $y = -\frac{g}{2v_0^2} \times x^2 + H.$

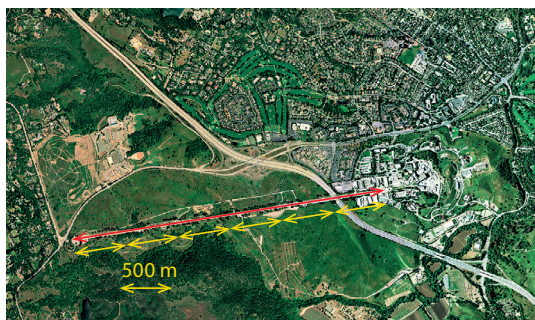
Lorsque le projectile touche le sol, $y = 0$ m.

$$0 = -\frac{g}{2v_0^2} \times x^2 + H \text{ d'où } x = \sqrt{\frac{2v_0^2 \times H}{g}} = v_0 \times \sqrt{\frac{2 \times H}{g}}.$$

L'abscisse du point de chute est bien $x = v_0 \times \sqrt{\frac{2 \times H}{g}}.$

27 Le SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)

La longueur de cet accélérateur est environ six fois plus grande que l'étalon de distance indiqué sur la photographie.



Les électrons sont donc accélérés sur une distance de $500 \text{ m} \times 6 = 3\,000 \text{ m}$.

Le gain d'énergie d'un électron est :

$$15,6 \text{ MeV} \cdot \text{m}^{-1} \times 3\,000 \text{ m} = 4,68 \times 10^4 \text{ MeV} = 46,8 \text{ GeV}.$$

Remarque : Une telle énergie, acquise par l'électron sous forme

cinétique, conduirait à une valeur de la vitesse $v = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_c}{m}}$

$$\text{soit } v = \sqrt{\frac{2 \times 46,8 \times 10^9 \text{ eV} \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1}}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$\text{soit } v = 1,3 \times 10^{11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Cette valeur, qui dépasse la célérité de la lumière dans le vide, n'est pas cohérente.

L'électron est ici une particule relativiste et la relation $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m \times v^2$,

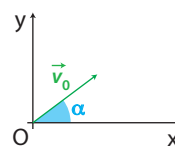
issue de la mécanique de Newton, ne peut pas s'appliquer.

La théorie de la relativité affirme qu'il est impossible d'accélérer un corps jusqu'à la vitesse de la lumière dans le vide.

28 Comment améliorer la performance d'un tir ?

1.a. Le système étudié est le boulet modélisé par son centre de masse G dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

Les conditions initiales sont schématisées ci-dessous.



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

D'après la deuxième loi de Newton,

$$\sum \vec{F} = m \vec{a} \text{ avec } \sum \vec{F} = \vec{P} = m \vec{g}. \text{ Il vient } \vec{a} = \vec{g}.$$

Le vecteur accélération du boulet soumis uniquement à son poids est égal au vecteur champ de pesanteur.

b. Les coordonnées du vecteur accélération sont :

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

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

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

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

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

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

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

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

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

De plus $\vec{OP}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases}.$

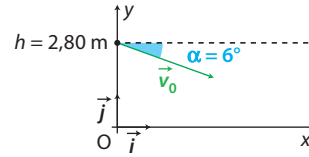
Il vient $\begin{cases} v_0 \times \cos \alpha \times 0 + D_x = 0 \\ -\frac{1}{2} g \times 0^2 + v_0 \times \sin \alpha \times 0 + D_y = 0 \end{cases}.$

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

Les équations horaires du mouvement du boulet s'écrivent :

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

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



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

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

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

3. Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération sont :

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

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

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

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

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

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

C'est l'équation cartésienne de la trajectoire du boulet.

d. L'altitude initiale du boulet est $y_0 = 0$ m.

À l'aide de l'équation cartésienne de la trajectoire du boulet, cherchons, pour quelles abscisses, l'ordonnée est nulle.

$$0 = -\frac{g}{2v_0^2 \times \cos^2\alpha} \times x^2 + \tan\alpha \times x$$

D'où $\left(-\frac{g}{2v_0^2 \times \cos^2\alpha} \times x + \tan\alpha\right) \times x = 0$.

Il vient $x = 0$ m, position initiale du boulet où :

$$x = d = \tan\alpha \times \frac{2v_0^2 \times \cos^2\alpha}{g}$$

Or, $\tan\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$ d'où $d = \frac{2v_0^2 \times \cos\alpha \times \sin\alpha}{g} = \frac{v_0^2 \times \sin 2\alpha}{g}$.

2.a. Pour un même angle α , la portée est d'autant plus grande que la valeur de la vitesse initiale v_0 du boulet est grande.

b. Pour une même valeur de vitesse initiale du boulet, la portée est maximale pour un angle α égal à 45° .

Remarque : ceci se retrouve avec la formule $d = \frac{v_0^2 \times \sin 2\alpha}{g}$

qui montre que d est maximale pour $\sin 2\alpha = 1$, d'où $2\alpha = \frac{\pi}{2}$ et $\alpha = \frac{\pi}{4}$ rad.

29 **Côté maths**
Déterminer des primitives

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

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

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

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

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

2. La coordonnée cartésienne v_z du vecteur vitesse est la primitive de la coordonnée cartésienne a_z du vecteur accélération : $v_z = g \times t + C_z$.

La 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 : $z_0 = 0$ m.

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

La coordonnée cartésienne du vecteur position a pour expression $z = \frac{1}{2}g \times t^2$.

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

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

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

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

Il vient :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

31 Python

Trajectoire d'une particule chargée

Ressources pour le professeur à télécharger :

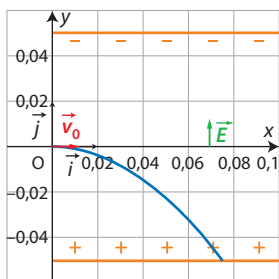
- Fichiers Python
- Explications du programme en langage Python

1. Le champ électrique entre les armatures d'un condensateur

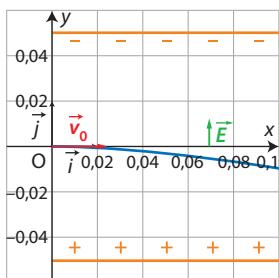
plan a pour valeur $E = \frac{|U|}{d}$. Dans cette relation, U est la tension électrique entre les plaques et d la distance qui les sépare. Pour modifier la valeur de E , on peut donc modifier U ou d .

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

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



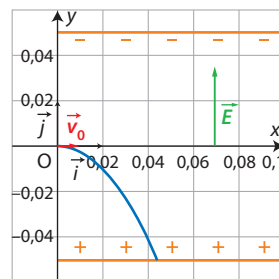
• Courbe obtenue pour $v_0 = 3,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:



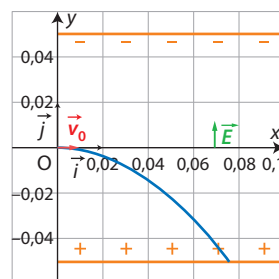
Conclusion : La trajectoire est de moins en moins incurvée lorsque la valeur de la vitesse initiale augmente.

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

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



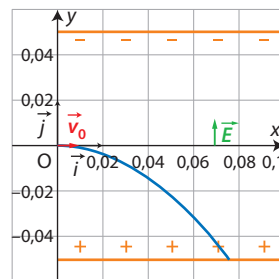
• Courbe obtenue pour $E = 1,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$:



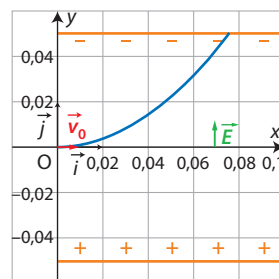
Conclusion : La trajectoire est de moins en moins incurvée lorsque la valeur du champ électrique E diminue.

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

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



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

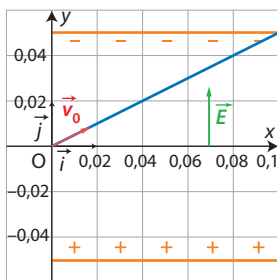


Conclusion : Le signe de la charge de la particule donne le sens de l'incurvation de la trajectoire : vers le haut pour des particules chargées positivement, vers le bas pour des particules chargées négativement.

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

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

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



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

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

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

On relève sur le schéma de la situation :

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

On remplace dans l'équation de la trajectoire x par ℓ et α par 27° . On cherche alors la valeur de h pour les valeurs de e , E , v_0 et m_e données :

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

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

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

32 Penalty in rugby

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

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

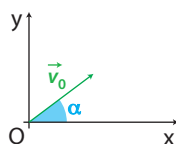
Les frottements de l'air sur le ballon sont négligés.

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

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

Réponses

1. Le système étudié est le centre de masse G du ballon de rugby dans un référentiel terrestre supposé galiléen. Les conditions initiales du ballon sont schématisées ci-dessous.



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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération sont :

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

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

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

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

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

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3. Le ballon passe au-dessus de la barre transversale si son ordonnée, pour une abscisse $x = 38 \text{ m}$, est supérieure à $h = 3,0 \text{ m}$. Pour cela, on utilise l'équation de la trajectoire de la balle :

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

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

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

33 À chacun son rythme

L'expérience de J. J. THOMSON

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

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

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

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

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération s'écrivent :

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

Sur le schéma, l'électron est dévié vers le haut. La force électrique est donc orientée vers le haut et la coordonnée a_y est positive. Pour écrire les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse, il faut chercher les primitives de chaque coordonnée du vecteur accélération puis appliquer les conditions initiales.

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

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

34 Émission de rayons X par collision avec des électrons

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. Application numérique :

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

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

35 Résolution de problème

Le MEB (microscope électronique à balayage)

1^{re} étape : S'approprier la question posée

Il s'agit de montrer que l'accélération d'un électron par un champ électrique permet à cet électron d'atteindre une vitesse de l'ordre de $0,20 \times c$ où c est la célérité de la lumière dans le vide.

2^e étape : Lire et comprendre les documents

Le doc. **A** :

– indique que les électrons sont accélérés grâce à un champ électrique ;

– précise que ce champ électrique est uniforme.

Le doc. **B** indique deux caractéristiques du canon à électrons : la tension U_{AB} et la distance séparant les armatures.

3^e étape : Dégager la problématique

La valeur de la vitesse des électrons à la sortie du canon à électron est-elle environ égale à $6,7 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$?

4^e étape : Construire la réponse

1. Définir le système étudié, choisir le référentiel d'étude.
2. Faire l'inventaire des forces qui s'appliquent sur le système.
3. Utiliser le théorème de l'énergie cinétique.
4. Calculer la valeur de la vitesse d'un électron à la sortie du canon à électron.
5. Comparer cette valeur de vitesse à celle de la lumière.

5^e étape : Répondre

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

On cherche à déterminer la valeur de la vitesse d'un électron à la sortie d'un canon à électrons puis à la comparer à la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide.

- Mettre en forme la réponse

Le système étudié est l'électron dans un référentiel terrestre supposé galiléen. Il n'est soumis qu'à la force électrique due au champ électrique uniforme dans le condensateur plan. On néglige le poids de l'électron devant la force électrique qu'il subit.

D'après le théorème de l'énergie cinétique :

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

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

avec v_A négligeable.

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

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

$$v_B = \sqrt{\frac{-2 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times (-10 \times 10^3 \text{ V})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

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

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

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

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

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

L'hypothèse consistant à négliger le poids devant la force électrique est très raisonnable puisque le rapport de leurs valeurs est

$$\frac{F}{P} = 1,8 \times 10^{16}.$$

Vers le Bac

p. 258

Préparation à l'écrit

36 Service et réception au volley

Partie I

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

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

$$\vec{P} = m \vec{g}. \text{ Il vient } \vec{a} = \vec{g}.$$

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 $(O; x, y)$.

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

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

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = -g \times t + C_y \end{cases}, \text{ de plus } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = v_0 \\ v_{y_0} = 0 \end{cases}.$$

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport

$$\text{au temps : } \vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}.$$

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

$$\vec{OB} \begin{cases} x = v_0 \times t + D \\ y = -\frac{1}{2} g \times t^2 + D_y \end{cases}. \text{ De plus, } \vec{OB}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = h \end{cases}.$$

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

Les équations horaires du mouvement du ballon de volley-ball s'écrivent :

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

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

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 :

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

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 $x < L$.

D'après l'équation de la trajectoire :

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

Cette équation admet deux solutions :

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

x_2 est ici physiquement impossible car de signe négatif.

Le ballon touche le sol pour :

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

$x = 17,5 \text{ m}$, 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 positions B_0 et B_{sol} , position du centre de masse du ballon lorsqu'il touche le sol :

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

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

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

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

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

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 la valeur de la vitesse réelle du ballon quand il touche le sol sera plus faible que la valeur théorique calculée précédemment.

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 au bout de la durée $\Delta t = t_R$, 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.

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

$$x = \sqrt{\frac{(2 \times 21,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \times (3,50 - 0,80) \text{ m}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}} \text{ soit } x = 16 \text{ m}.$$

• Durée mise par le ballon pour atteindre cette altitude :

On utilise une des deux équations horaires.

$$x = v_0 \times t_R \text{ d'où } t_R = \frac{x}{v_0}.$$

$$\text{Il vient } t_R = \frac{16 \text{ m}}{21,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}, \text{ soit } t_R = 0,76 \text{ s}.$$

Le ballon met la durée $\Delta t = 0,76 \text{ s}$ pour atteindre une altitude de 80 cm.

• Valeur de la vitesse moyenne de l'adversaire :

Le joueur a une abscisse initiale de 17,0 m et doit atteindre en 0,76 s une abscisse de 16 m.

$$v_{\text{moy}} = \frac{d}{t} \text{ soit } v_{\text{moy}} = \frac{1,0 \text{ m}}{0,76 \text{ s}}.$$

La valeur de la vitesse moyenne du joueur est environ $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur, voisine de $4,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ est tout à fait réaliste.

Préparation à l'ECE

1. Le système étudié est le centre de masse G de la balle dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

La balle n'est soumise 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 :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \\ a_y = -g \end{cases}.$$

Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse par rapport

$$\text{au temps : } \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

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

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = C_x \\ v_y = -g \times t + C_y \end{cases}, \text{ de plus } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{x_0} = v_0 \times \cos \alpha \\ v_{y_0} = -v_0 \times \sin \alpha \end{cases}.$$

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

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

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport

$$\text{au temps : } \vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}.$$

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

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

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

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

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

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

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

2. À l'aide d'un logiciel de traitement de vidéo, on place l'origine du repère d'étude au centre de masse G de la balle. Il faut indiquer une échelle à l'aide d'un étalon de longueur présent sur la vidéo. On pointe, sur chaque image de la vidéo, la position du centre de masse de la balle.

On utilise les fonctionnalités d'un logiciel tableur-grapheur pour calculer les coordonnées des vecteurs vitesse du centre de masse G de la balle et pour tracer les courbes $x(t)$, $y(t)$, $v_x(t)$ et $v_y(t)$.

3. • La hauteur h de départ correspond à l'ordonnée de la balle à $t = 0 \text{ s}$. Par lecture graphique, on a $h = 0,9 \text{ m}$.

- La valeur de la vitesse initiale de la balle est :

$$v_0 = \sqrt{v_{x_0}^2 + v_{y_0}^2} \text{ avec, par lecture graphique, } v_{x_0} = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ et } v_{y_0} = -0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$v_0 = \sqrt{(1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 + (-0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2} = 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur de la vitesse initiale est $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- L'angle α est obtenu à partir du calcul de sa tangente :

$$\tan \alpha = \frac{|v_{y_0}|}{v_{x_0}} \text{ et donc } \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{|v_{y_0}|}{v_{x_0}} \right). \text{ Il vient } \alpha = 34^\circ.$$

Remarque : Il est possible d'utiliser les équations obtenues par modélisation des courbes $x(t)$, $y(t)$, $v_x(t)$ et $v_y(t)$ afin de déterminer h , v_0 et α .

Vers l'oral

p. 260

Je m'exprime à l'oral sur

Le mouvement dans un champ uniforme

- Citer quelques champs uniformes.

Le champ de pesanteur terrestre est uniforme dans une zone restreinte de la surface de la Terre.

Le champ électrique est uniforme au centre des armatures d'un condensateur plan.

- Expliquer le fonctionnement d'un accélérateur linéaire de particules chargées.

Un accélérateur linéaire permet d'accélérer en ligne droite des particules chargées.

Cette accélération est produite par un champ électrique uniforme ayant :

- pour direction : l'axe de l'accélérateur ;
- pour sens : de l'entrée vers la sortie si la charge électrique est positive, le sens contraire si la charge électrique est négative.

- Quelle est l'accélération d'un système qui chute sans frottement dans le champ de pesanteur terrestre ?

Un système en chute libre est soumis uniquement à son poids.

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

13

Mouvement dans un champ de gravitation

Programme officiel

Mouvement et interactions

| 2. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement | |
|--|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| Mouvement dans un champ de gravitation Mouvement des satellites et des planètes. Orbite. Lois de Kepler. Période de révolution. Satellite géostationnaire. | Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien. Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire. 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. |

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

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

Activité 1

documentaire Les satellites artificiels de la Terre p. 262

Capacité exigible

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

Analyse des documents

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

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

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

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

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

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

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

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

On retrouve bien une altitude voisine de 36 000 km.

Autre approche :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Un pas vers le cours

3 Le mouvement des satellites artificiels est caractérisé par :

- leur orbite (trajectoire du satellite dans le référentiel géocentrique) ;
- leur période de révolution (durée nécessaire pour effectuer un tour complet de trajectoire).

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

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

Cette activité permet également de travailler sur les satellites géostationnaires.

Activité 2

numérique Les lois de Kepler à l'ère de l'informatique p. 263

Capacités exigibles

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

Simulation numérique

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

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

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

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

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

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

En conservant deux chiffres significatifs :

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

La troisième loi de Kepler est vérifiée.

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

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

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

La comète de Halley orbite autour du Soleil.

Un pas vers le cours

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

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

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

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

Ressources pour le professeur à télécharger :

- Fichier Python
- Explications du programme en langage Python

Capsule vidéo de cours : Lois de Kepler

QCM

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

Exercices

Appliquer le cours p. 270

2 Donner les caractéristiques d'une force de gravitation (1)

1. La force de gravitation exercée par la Terre sur la Lune a pour expression :

$$\vec{F}_{T/L} = G \times \frac{M_T \times M_L}{r^2} \vec{u}_n.$$

2. Valeur de cette force : $F_{T/L} = G \times \frac{M_T \times M_L}{r^2}$

$$F_{T/L} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times \frac{5,97 \times 10^{24} \text{ kg} \times 7,36 \times 10^{22} \text{ kg}}{(3,84 \times 10^8 \text{ m})^2}$$

$$F_{T/L} = 2,0 \times 10^{20} \text{ N}$$

À l'échelle 1 cm \leftrightarrow 0,5 \times 10²⁰ N, 2,0 \times 10²⁰ N \leftrightarrow 4,0 cm.

On représente donc un segment fléché de 4,0 cm à partir du centre de la Lune et dirigé vers celui de la Terre.

3 Donner les caractéristiques d'une force de gravitation (2)

On a $\vec{F}_{T/\text{Mét}} = m \vec{G}_T$ d'où $F_{T/\text{Mét}} = m \times G_T$.

Ainsi $F_{T/\text{Mét}} = 400 \text{ kg} \times 2,23 \times 10^{-1} \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$

$F_{T/\text{Mét}} = 89,2 \text{ N}$.

La valeur de la force de gravitation exercée par la Terre sur un satellite Météosat est 89,2 N.

4 Exploiter les coordonnées d'un vecteur accélération

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Le vecteur accélération \vec{a} du centre de masse de Vénus et le vecteur unitaire \vec{u}_n sont colinéaires. Le coefficient de proportionnalité

$G \times \frac{M_S}{r^2}$ est positif ; ces deux vecteurs sont donc de même sens.

Le vecteur accélération du centre de masse de Vénus a pour direction la droite passant par les centres de Vénus et du Soleil. Il est dirigé de Vénus vers le Soleil.

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

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

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

6 Déterminer les caractéristiques d'une vitesse

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1. D'après la photographie, on a $r_p < r_Q$.

D'après son expression littérale, la valeur v de la vitesse est inversement proportionnelle à la racine carrée du rayon r de la trajectoire circulaire.

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

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

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

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

8 Établir la troisième loi de Kepler (1)

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

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

2. En élevant au carré, $T^2 = 4\pi^2 \times r^2 \times \frac{r}{G \times M_J}$;

$$\text{on obtient : } \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_J}.$$

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

9 Établir la troisième loi de Kepler (2)

$$\text{On a } T = 2\pi \times r \times \sqrt{\frac{r}{G \times M_T}}$$

En élevant au carré, on obtient $T^2 = 4\pi^2 \times r^2 \times \frac{r}{G \times M_T}$.

$$\text{Soit } T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_T} \text{ d'où } \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_T}.$$

La troisième loi de Kepler s'écrit : $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$.

On en déduit que la constante relative à la troisième loi de Kepler pour les satellites de la Terre a pour expression $\frac{4\pi^2}{G \times M_T}$.

10 Exploiter la troisième loi de Kepler (1)

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

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

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

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

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

Ces satellites orbitent donc tous les deux autour de Jupiter.

11 Exploiter la troisième loi de Kepler (2)

D'après la troisième loi de Kepler appliquée dans le référentiel jupiterocentrique, on peut par exemple écrire :

$$\frac{T_{\text{Gan}}^2}{r_{\text{Gan}}^3} = \frac{T_{\text{Eur}}^2}{r_{\text{Eur}}^3} \text{ d'où } T_{\text{Eur}}^2 = \frac{T_{\text{Gan}}^2 \times r_{\text{Eur}}^3}{r_{\text{Gan}}^3}.$$

$$\text{Il vient } T_{\text{Eur}} = T_{\text{Gan}} \times \sqrt{\frac{r_{\text{Eur}}^3}{r_{\text{Gan}}^3}}$$

$$T_{\text{Eur}} = 7,15 \text{ jours} \times \sqrt{\frac{(6,71 \times 10^5 \text{ km})^3}{(1,07 \times 10^6 \text{ km})^3}}$$

La période de révolution d'Europe autour de Jupiter est 3,55 jours.

Exercices

S'entraîner

p. 271

12 Connaître les critères de réussite Satellite CFOSAT

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

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

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

$r = R_T + h$ (h est l'altitude du satellite).

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

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

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

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

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

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

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 circulaire uniforme, on a donc :

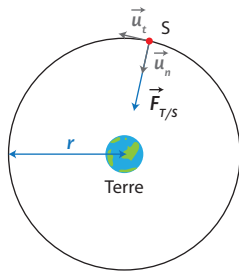
$$T = \frac{2\pi \times (R_T + h)}{v} \text{ et } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}$$

$$\text{Il vient } T = \frac{2\pi \times (R_T + h)}{\sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}}, \text{ d'où } T = 2\pi \times (R_T + h) \times \sqrt{\frac{R_T + h}{G \times M_T}}$$

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

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(6,4 \times 10^6 \text{ m} + 519 \times 10^3 \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}}}$$

La période de révolution de S est $5,7 \times 10^3 \text{ s}$.



13 À chacun son rythme Satellites d'Uranus

1. Dans le référentiel centré sur Uranus, le carré de la période T de révolution des satellites d'Uranus est proportionnel au cube du demi-grand axe a de leur orbite : $\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$.

Dans le cas d'une trajectoire circulaire, $a = r$ avec r le rayon de la trajectoire circulaire du satellite autour d'Uranus. La troisième loi de Kepler se note alors $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$.

2.

| Satellite | Miranda | Ariel | Umbriel | Titania |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| T (j) | 1,413 | 2,520 | 4,144 | 8,706 |
| r (km) | 129 780 | 192 240 | 265 970 | 435 840 |
| $\frac{T^2}{r^3}$ ($\text{j}^2 \cdot \text{km}^{-3}$) | $9,134 \times 10^{-16}$ | $8,939 \times 10^{-16}$ | $9,127 \times 10^{-16}$ | $9,155 \times 10^{-16}$ |

3. $\frac{T^2}{r^3}$ est quasiment une constante pour les satellites d'Uranus, donc la troisième loi de Kepler est vérifiée.

14 Balance cosmique

1. Dans le référentiel héliocentrique considéré galiléen, la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse d'une planète donne : $\vec{F}_{S/P} = m \vec{a}$ avec m la masse d'une planète,

$$\text{et } \vec{F}_{S/P} = G \times \frac{m \times M_S}{r^2} \vec{u}_n; \text{ d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_S}{r^2} \vec{u}_n$$

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

La coordonnée normale de l'accélération $a_n = \frac{v^2}{r}$.

$$\text{Par identification, } \frac{v^2}{r} = G \times \frac{M_S}{r^2} \text{ ainsi } v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$$

La valeur de la vitesse d'une planète dans le référentiel héliocentrique est $\sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$ avec r le rayon de leur trajectoire supposée circulaire.

2. La période de révolution des planètes est égale à la durée mise par ces planètes pour faire un tour complet du Soleil à la vitesse de valeur v suivant une trajectoire circulaire : $T = \frac{2\pi \times r}{v}$.

$$\text{Or } v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}$$

$$\text{Il vient } T = \frac{2\pi \times r}{\sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}}, \text{ d'où } T = 2\pi \times r \sqrt{\frac{r}{G \times M_S}}$$

$$\text{soit } T = 2\pi \times \sqrt{\frac{r^3}{G \times M_S}}$$

3. En élevant au carré, $T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_S}$; soit $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_S}$.

G et M_S sont des constantes, donc $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$, ce qui vérifie la troisième loi de Kepler dans le référentiel héliocentrique.

4. À partir de $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_S}$, on isole M_S ; soit $M_S = \frac{4\pi^2}{G \times T^2} \times r^3$.

En prenant les valeurs de T et r pour Mars, il vient :

$$M_S = \frac{4\pi^2 \times (2,28 \times 10^{11} \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times (1,88 \times 3,156 \times 10^7 \text{ s})^2}$$

$M_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$.

5. Pour un astre possédant des satellites et connaissant les paramètres orbitaux de ces satellites (période et demi-grand axe de l'ellipse), il est possible de déterminer la masse de l'astre attracteur. La troisième loi de Kepler joue alors le rôle de balance cosmique.

15 Résolution de problème

Station spatiale internationale

1^{re} étape : S'approprier la question posée

1. Dans quel référentiel étudier le mouvement d'un satellite de la Terre ?
2. Quel est le repère le plus adapté pour étudier le mouvement de l'ISS ?
3. Quelles sont les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

- Pour étudier le mouvement d'un satellite de la Terre, il est préférable d'utiliser le référentiel géocentrique. La deuxième loi de Newton est plus facile à utiliser dans le repère de Frenet dont l'origine est placée au centre de masse de l'ISS.
- On se place dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme, le vecteur vitesse a une valeur constante et le vecteur accélération de l'ISS sera perpendiculaire à sa trajectoire et dirigé vers le centre de la Terre.

3^e étape : Dégager la problématique

Comment déterminer l'altitude de la station spatiale internationale dans le référentiel géocentrique, à partir de la deuxième loi de Newton, connaissant la valeur de sa vitesse ?

4^e étape : Construire la réponse

- Définir le système, le référentiel.
- Faire l'inventaire des forces appliquées au système.
- Appliquer la deuxième loi de Newton et travailler dans le repère de Frenet.
- Établir l'expression de la valeur v de la vitesse de l'ISS.
- Extraire puis calculer l'altitude de l'ISS ; vérifier qu'elle est inférieure à 2 000 km, zone d'une orbite terrestre basse.

5^e étape : Répondre

Le système étudié est l'ISS dans le référentiel géocentrique considéré galiléen. On souhaite déterminer l'altitude de l'ISS à partir de la deuxième loi de Newton, connaissant la valeur de sa vitesse. On suppose que l'ISS n'est soumise qu'à la force de gravitation exercée par la Terre qui a pour expression dans le repère de Frenet :

$\vec{F}_{T/ISS} = G \times \frac{m \times M_T}{r^2} \vec{u}_n$, avec m la masse de l'ISS et r le rayon de sa trajectoire circulaire.

On applique la deuxième loi de Newton.

$$\vec{F}_{T/ISS} = m \vec{a}.$$

$$\text{Il vient } G \times \frac{m \times M_T}{r^2} \vec{u}_n = m \vec{a} \text{ avec } r = R_T + h;$$

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

La coordonnée normale de l'accélération a pour expression :

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{v^2}{R_T + h}.$$

$$\text{On peut donc écrire : } \frac{v^2}{R_T + h} = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}.$$

$$\text{D'où } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

On connaît la valeur v de la vitesse, on extrait de cette relation l'altitude h . Soit :

$$v^2 = \frac{G \times M_T}{R_T + h} \Leftrightarrow R_T + h = \frac{G \times M_T}{v^2}. \text{ Ainsi } h = \frac{G \times M_T}{v^2} - R_T$$

$$h = \frac{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}}{(7,66 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2} - 6,4 \times 10^6 \text{ m}.$$

$$h = 4,2 \times 10^5 \text{ m}.$$

L'altitude de l'ISS est $4,2 \times 10^5$ m soit $4,2 \times 10^2$ km. Cette altitude est inférieure à 2 000 km synonyme d'une orbite terre basse. À une telle altitude, il est plutôt raisonnable de ne pas prendre en compte les forces de frottement dues à l'air de l'atmosphère terrestre.

16 Éris et Dysnomia

1. Le référentiel permettant d'étudier Dysnomia est lié au centre d'Éris.

2. $\vec{F}_{E/D} = G \times \frac{m \times M_E}{r_D^2} \vec{u}$ où m est la masse de Dysnomia et \vec{u} est

un vecteur unitaire attaché au repère de Frenet liée à Dysnomia qui pointe vers le centre d'Éris.

La deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse de Dysnomia permet d'écrire :

$$\vec{F}_{E/D} = m \vec{a} \text{ d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_E}{r_D^2} \vec{u}.$$

Le vecteur accélération \vec{a} du centre de masse de Dysnomia est perpendiculaire à sa trajectoire et pointe vers le centre d'Éris. Sa valeur $a = G \times \frac{M_E}{r_D^2}$.

3. La coordonnée normale de l'accélération a pour expression :

$$a_n = \frac{v^2}{r_D}. \text{ On a donc } \frac{v^2}{r_D} = G \times \frac{M_E}{r_D^2}, \text{ ainsi } v = \sqrt{\frac{G \times M_E}{r_D}}.$$

La période de révolution de Dysnomia est égale à la durée mise par ce satellite pour faire un tour complet d'Éris à la vitesse de valeur v suivant une trajectoire circulaire :

$$T_D = \frac{2\pi \times r_D}{v} \text{ et } v = \sqrt{\frac{G \times M_E}{r_D}}.$$

$$\text{Il vient } T_D = \frac{2\pi \times r_D}{\sqrt{\frac{G \times M_E}{r_D}}}; \text{ d'où } T_D = 2\pi \times r_D \sqrt{\frac{r_D}{G \times M_E}},$$

$$\text{soit } T_D = 2\pi \times \sqrt{\frac{r_D^3}{G \times M_E}}.$$

$$4. \text{ En élevant au carré, } T_D^2 = 4\pi^2 \times \frac{r_D^3}{G \times M_E}.$$

$$\text{D'où } M_E = \frac{4\pi^2}{G \times T_D^2} \times r_D^3.$$

$$M_E = \frac{4\pi^2 \times (3,60 \times 10^7 \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times (15,0 \times 24 \times 3600 \text{ s})^2}$$

$$M_E = 1,64 \times 10^{22} \text{ kg}.$$

La masse d'Éris est $1,64 \times 10^{22}$ kg.

17 Geostationary Satellite

Traduction : Ariespace a mis en orbite le CondoSat Saudi Geostationary Satellite 1/Hellas Sat 4, pour le compte des opérateurs KACST et Hellas Sat.

Ce premier lancement de l'année réalisé par Ariespace a eu lieu le mardi 5 février à 18 h 01 (heure locale de Kourou) depuis le

Centre Spatial Guyanais (CSG), base de lancement européenne. Cet investissement marque la 103^e mission d'Ariane 5 et porte à 374 le nombre de satellites placés en orbite géostationnaire par Arianespace.

Le CondoSat est en orbite circulaire autour de la Terre sur son plan équatorial, à une altitude h , dans le référentiel géocentrique considéré comme un référentiel galiléen.

1. Définir le terme géostationnaire.

2.a. Donner les caractéristiques de l'accélération \vec{a} et de la vitesse \vec{v} du centre de gravité du CondoSat dans le référentiel géocentrique.

b. Montrer que le mouvement du centre de gravité du CondoSat est uniforme.

3. La période de révolution du CondoSat doit être équivalente à celle de la Terre.

Justifier cette affirmation.

4. Déterminer l'altitude h à laquelle le CondoSat est placé en orbite géostationnaire.

Réponses :

1. Un satellite géostationnaire est un satellite immobile dans un référentiel terrestre.

2.a. Appliquons la deuxième loi de Newton au satellite CondoSat, de masse m , dans le référentiel géocentrique :

$$\vec{F}_{T/S} = m \vec{a} \text{ avec } \vec{F}_{T/S} = G \times \frac{m \times M_T}{r^2} \vec{u}_n \text{ et } r = R_T + h.$$

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

Le vecteur accélération \vec{a} du centre de masse du CondoSat est perpendiculaire à sa trajectoire et dirigé vers le centre de la Terre.

$$\text{Sa valeur est } a = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}.$$

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

La coordonnée normale de l'accélération est $a_n = \frac{v^2}{r}$,

$$\text{avec } r = R_T + h, \text{ soit } a_n = \frac{v^2}{R_T + h}. \text{ Or } a_n = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}.$$

$$\text{Il vient } \frac{v^2}{R_T + h} = G \times \frac{M_T}{(R_T + h)^2}. \text{ Ainsi } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

Le vecteur vitesse \vec{v} du centre de masse du satellite est tangent à sa trajectoire, orienté dans le sens du mouvement et sa valeur

$$\text{est } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

b. La coordonnée tangentielle $a_t = \frac{dv}{dt}$ de l'accélération du satellite est nulle, donc la valeur v de sa vitesse est constante. Le mouvement du CondoSat dans le référentiel géocentrique est uniforme.

3. Pour être immobile dans le référentiel terrestre, le satellite doit être immobile par rapport à un point à la surface de la Terre. Donc la période de révolution du satellite autour de la Terre doit être la même que celle d'un point de la surface de la Terre.

4. La période de révolution du CondoSat est égale à la durée mise par ce satellite pour faire un tour complet de trajectoire circulaire à la vitesse de valeur v :

$$T_T = \frac{2\pi \times (R_T + h)}{v} \text{ avec } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}.$$

$$\text{Il vient } T_T = \frac{2\pi \times (R_T + h)}{\sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}};$$

$$\text{d'où } T_T = 2\pi \times (R_T + h) \times \sqrt{\frac{R_T + h}{G \times M_T}}$$

$$\text{soit } T_T = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \times M_T}}.$$

On extrait h de cette expression :

$$T_T^2 = 4\pi^2 \times \frac{(R_T + h)^3}{G \times M_T} \text{ d'où } (R_T + h)^3 = \frac{T_T^2 \times G \times M_T}{4\pi^2}$$

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

Avec $T_T = (23 \times 3\,600 + 56 \times 60 + 4) \text{ s}$, on obtient $h = 3,6 \times 10^7 \text{ m}$. Le CondoSat se situe à une altitude de $3,6 \times 10^7 \text{ m}$.

18 Python

Des satellites artificiels...

Ressources pour le professeur à télécharger :

- Fichier Python
- Explications du programme en langage Python

1.a. Les points sont alignés et la droite qui les modélise semble passer par l'origine.

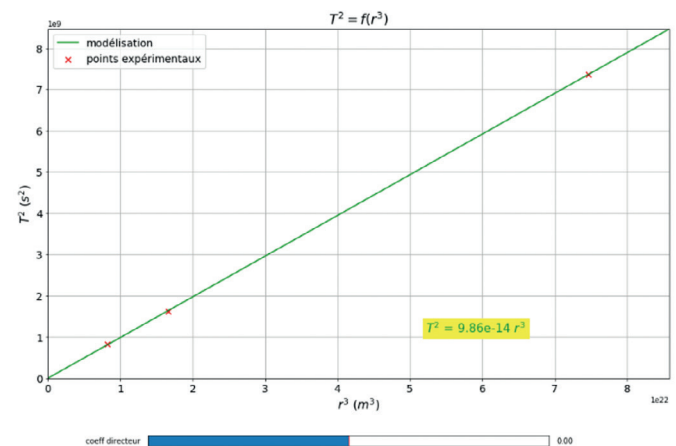
b. La ligne 33 permet de réaliser la modélisation mathématique de la courbe $T^2 = f(r^3)$.

c. La valeur affectée par défaut au coefficient directeur de cette modélisation est indiquée à la ligne 35 : `init_a=6.00e-14`.

Elle est égale à $6,00 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

2. En ajustant au mieux le curseur, on obtient :

$$a = 9,86 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}.$$



3. La courbe représentative de la fonction $T^2 = f(r^3)$ est une droite passant par l'origine d'équation : $T^2 = k \times r^3$.

On a bien $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$ qui exprime la troisième loi de Kepler.

4. La troisième loi de Kepler s'écrit dans l'approximation des orbites circulaires :

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_T} = a. \text{ On extrait } M_T = \frac{4\pi^2}{G \times a}.$$

$$M_T = \frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 9,86 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}}$$

La masse de la Terre est $6,00 \times 10^{24} \text{ kg}$.

19 Neptune et Néréide

1. D'après le doc. **A**, on constate que $b < a$. Dans le référentiel centré sur Neptune, le mouvement de Néréide n'est pas circulaire.

2. a. D'après la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse de Triton dans le référentiel neptunocentrique, on a :

$$\vec{F}_{N/T} = m \vec{a} \text{ avec } \vec{F}_{N/T} = G \times \frac{m \times M_N}{r_{\text{Triton}}^2} \vec{u}_n.$$

$$\text{Il vient } \vec{a} = G \times \frac{M_N}{r_{\text{Triton}}^2} \vec{u}_n.$$

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

La coordonnée normale de l'accélération a pour expression :

$$a_n = \frac{v^2}{r_{\text{Triton}}}.$$

$$\text{D'où } G \times \frac{M_N}{r_{\text{Triton}}^2} = \frac{v^2}{r_{\text{Triton}}}. \text{ Ainsi } v = \sqrt{\frac{G \times M_N}{r_{\text{Triton}}}}.$$

La période de révolution de Triton est égale à la durée mise par ce satellite pour faire un tour complet de trajectoire circulaire à la vitesse de valeur v :

$$T_{\text{Triton}} = \frac{2\pi \times r_{\text{Triton}}}{v} \text{ avec } v = \sqrt{\frac{G \times M_N}{r_{\text{Triton}}}}.$$

$$T_{\text{Triton}} = 2\pi \times r_{\text{Triton}} \sqrt{\frac{r_{\text{Triton}}}{G \times M_N}};$$

$$\text{soit } T_{\text{Triton}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{r_{\text{Triton}}^3}{G \times M_N}}.$$

En élevant au carré, on obtient :

$$\frac{T_{\text{Triton}}^2}{r_{\text{Triton}}^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M_N} = \text{constante, c'est la troisième loi de Kepler.}$$

$$\text{b. } \frac{T_{\text{Triton}}^2}{r_{\text{Triton}}^3} = \frac{(5,877 \text{ j})^2}{(3,547 \times 10^5 \text{ km})^3} = 7,740 \times 10^{-16} \text{ j}^2 \cdot \text{km}^{-3}.$$

$$\text{3. } \frac{T_{\text{Néréide}}^2}{a_{\text{Néréide}}^3} = \frac{(360 \text{ j})^2}{(5,513 \times 10^6 \text{ km})^3} = 7,73 \times 10^{-16} \text{ j}^2 \cdot \text{km}^{-3}.$$

Ces rapports sont bien égaux, aux arrondis près. Cela confirme que ces deux satellites orbitent autour du même astre central.

4. On peut généraliser à une orbite elliptique :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \times M} \text{ où } a \text{ est le demi-grand axe de l'orbite elliptique du satellite, } T \text{ sa période de révolution autour de cet astre central et}$$

M la masse de l'astre central.

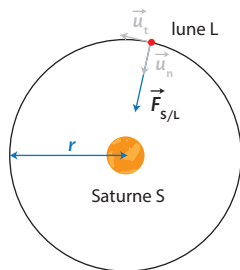
Vers le Bac

p. 274

Préparation à l'écrit

20 Les lunes de Saturne

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, la deuxième loi de Newton appliquée au centre de masse de la lune donne : $\vec{F}_{S/L} = m \vec{a}$.

$$\text{Or } \vec{F}_{S/L} = G \times \frac{m \times M_S}{r^2} \vec{u}_n, \text{ d'où } \vec{a} = G \times \frac{M_S}{r^2} \vec{u}_n.$$

$$\text{3.a. On a donc } \vec{a} \begin{cases} a_n = G \times \frac{M_S}{r^2} \\ a_t = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}.$$

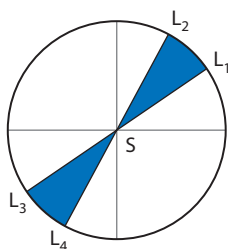
La coordonnée tangentielle de l'accélération $a_t = \frac{dv}{dt}$ est nulle, donc la valeur de la vitesse de la lune est constante : le mouvement est uniforme dans ce référentiel.

b. D'après la deuxième loi de Kepler, le segment de droite SL, reliant les centres de Saturne et de sa lune, balaie des aires égales pendant des durées égales.

Lorsque la trajectoire est circulaire, les distances parcourues (L_1, L_2) et (L_3, L_4) pendant une même durée sont égales.

4. La coordonnée normale de \vec{a} est :

$$a_n = \frac{v^2}{r}.$$



$$\text{Par identification, } G \times \frac{M_S}{r^2} = \frac{v^2}{r} \text{ d'où } v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}.$$

Le vecteur vitesse \vec{v} du centre de masse de la lune est tangent à la trajectoire, orienté dans le sens du mouvement et sa valeur

$$\text{est } v = \sqrt{\frac{G \times M_S}{r}}.$$

5.a. La période de révolution de la lune est égale à la durée mise par ce satellite pour faire un tour complet de Saturne à la vitesse

$$\text{de valeur } v \text{ suivant une trajectoire circulaire : } T = \frac{2\pi \times r}{v}.$$

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

La période de révolution de cette lune s'exprime par :

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

$$\text{b. On isole } M_S : T^2 = 4\pi^2 \times \frac{r^3}{G \times M_S} ; \text{ donc } M_S = \frac{4\pi^2}{G \times T^2} \times r^3$$

$$M_S = \frac{4\pi^2 \times (2,29 \times 10^{10} \text{ m})^3}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times (3,54 \times 3,156 \times 10^7 \text{ s})^2}.$$

La masse de Saturne est $5,69 \times 10^{26} \text{ kg}$.

$$\text{6. Si Météis est une lune de Saturne on a : } \frac{T_{\text{Météis}}^2}{r_{\text{Météis}}^3} = \frac{T_L^2}{r_L^3}.$$

$$\text{On calcule } \frac{T_L^2}{r_L^3} \text{ et } \frac{T_{\text{Météis}}^2}{r_{\text{Météis}}^3}.$$

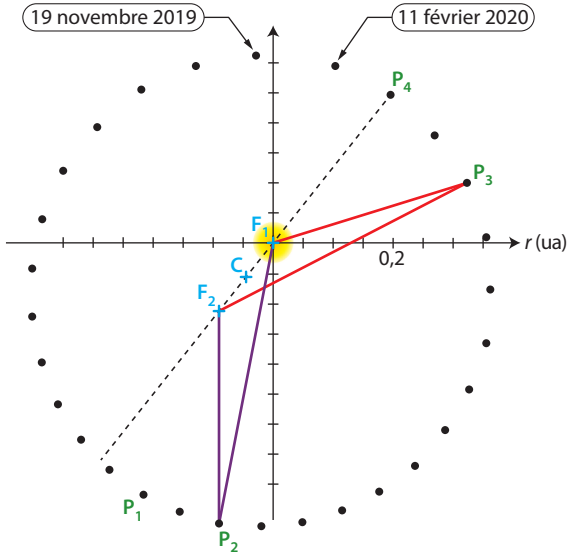
$$\frac{T_L^2}{r_L^3} = \frac{(3,54 \times 3,156 \times 10^7 \text{ s})^2}{(2,29 \times 10^{10} \text{ m})^3} = 1,04 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}.$$

$$\frac{T_{\text{Météis}}^2}{r_{\text{Météis}}^3} = \frac{(0,295 \times 24 \times 3600 \text{ s})^2}{(1,28 \times 10^8 \text{ m})^3} = 3,10 \times 10^{-16} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}.$$

$$\frac{T_L^2}{r_L^3} \neq \frac{T_{\text{Météis}}^2}{r_{\text{Météis}}^3} \text{ donc Météis n'est pas une lune de Saturne.}$$

Préparation à l'ECE

Partie I



Le Soleil est positionné en F_1 , un des foyers du grand axe $2a$. F_2 est le symétrique de F_1 par rapport au centre C , milieu du grand axe.

On détermine le rapport $k_i = \frac{P_i F_1 + P_i F_2}{2a}$ pour les quatre positions repérées :

| P_i | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| k_i | 1,02 | 1,02 | 1,04 | 1,00 |

On a, aux erreurs de mesure près, $MF_1 + MF_2 = 2a$. D'après le doc. **D**, la trajectoire de Mercure dans le référentiel héliocentrique est elliptique.

Partie II

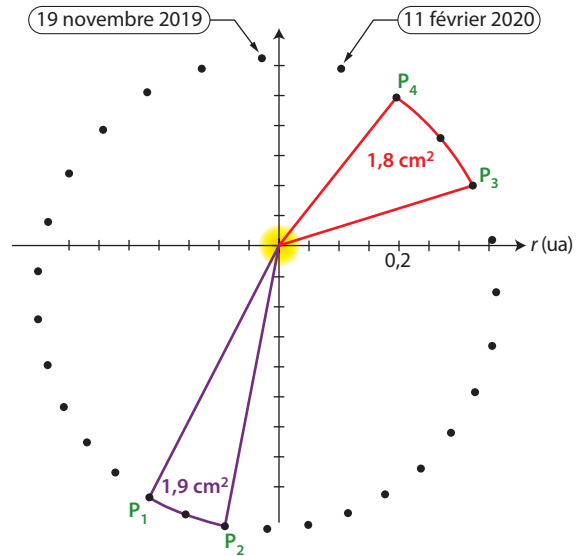
1. et 2. Voir la figure ci-après.

L'aire d'un secteur de l'ellipse peut en première approche se calculer comme l'aire d'un triangle dont on mesure la base et la hauteur, sachant que :

$$\mathcal{A} = \frac{\text{base} \times \text{hauteur}}{2}$$

$$\text{On a } \mathcal{A}_1 = \frac{P_1 P_2 \times SP_1}{2} \text{ et } \mathcal{A}_2 = \frac{P_3 P_4 \times SP_4}{2}$$

On trouve ici $\mathcal{A}_1 = 1,9 \text{ cm}^2$ et $\mathcal{A}_2 = 1,8 \text{ cm}^2$.



3. Les aires parcourues en des durées égales (6 jours) sont égales (aux erreurs de mesure près). La deuxième loi de Kepler est donc vérifiée.

Partie III

1. La courbe représentative de la fonction $T^2 = f(r^3)$ est une droite passant par l'origine du repère d'équation : $T^2 = K \times r^3$ avec $K = \text{constante}$.

On a bien $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$. La troisième loi de Kepler est donc vérifiée.

2. Pour les objets célestes du système solaire :

$$\frac{T^2}{r^3} = K \text{ avec } K = 3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \times \text{m}^{-3} \text{ (coefficient directeur).}$$

$$\text{On isole } r : r = \sqrt[3]{\frac{T^2}{K}}$$

Pour Cérès, $T = 4,5$ ans, soit $1,4 \times 10^8$ s.

$$\text{D'où } r = \sqrt[3]{\frac{(1,4 \times 10^8 \text{ s})^2}{3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}}}$$

Le rayon de l'orbite de Cérès autour du Soleil est $4,0 \times 10^{11}$ m.

Vers l'oral

Je m'exprime à l'oral sur

Le mouvement dans un champ de gravitation

• **Qu'est-ce qu'un satellite géostationnaire ?**

Un satellite géostationnaire est un satellite immobile dans un référentiel terrestre. Sa période de révolution autour de la Terre est égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même, proche de 24 heures (23 h 56 min 4 s).

• **Définir une période de révolution.**

La période de révolution d'un satellite autour d'un astre central est la durée mise par ce satellite pour effectuer un tour complet autour de l'astre central.

• **Citer la troisième loi de Kepler.**

Le carré de la période de révolution T d'un satellite est proportionnel au cube du demi-grand axe a de sa trajectoire elliptique autour d'un astre central.

La troisième loi de Kepler s'écrit : $\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$.

14

Modélisation de l'écoulement d'un fluide

Programme officiel

Mouvement et interactions

| 3. Modéliser l'écoulement d'un fluide | |
|---|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles |
| | <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| Poussée d'Archimède. | Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède. Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède. <i>Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.</i> |
| Écoulement d'un fluide en régime permanent. | Exploiter la conservation du débit volumique pour déterminer la vitesse d'un fluide incompressible. |
| Débit volumique d'un fluide incompressible. Relation de Bernoulli. Effet Venturi. | Exploiter la relation de Bernoulli, celle-ci étant fournie, pour étudier qualitativement puis quantitativement l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent. <i>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'écoulement permanent d'un fluide et pour tester la relation de Bernoulli.</i> |

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

| Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Échelles de description. Grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos : masse volumique, pression, température. Actions exercées par un fluide sur une surface : forces pressantes. Loi fondamentale de la statique des fluides. | <ul style="list-style-type: none"> Expliquer qualitativement le lien entre les grandeurs macroscopiques de description d'un fluide et le comportement microscopique des entités qui le constituent. Exploiter la relation $F = P \times S$ pour déterminer la force pressante exercée par un fluide sur une surface plane S soumise à la pression P. Dans le cas d'un fluide incompressible au repos, utiliser la relation fournie exprimant la loi fondamentale de la statique des fluides : $P_2 - P_1 = \rho \times g \times (z_1 - z_2)$. Tester la loi fondamentale de la statique des fluides. | <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> $\rho \text{ en } \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad \rho = \frac{m}{V} \quad \begin{matrix} \leftarrow m \text{ en kg} \\ \rightarrow V \text{ en m}^3 \end{matrix}$ </div> <div style="text-align: center;"> $F \text{ en N} \quad F = P \times S \quad \begin{matrix} \leftarrow P \text{ en } \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \text{ ou pascal (Pa)} \\ \leftarrow S \text{ en m}^2 \end{matrix}$ </div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> $P_B - P_A = \rho \times g \times (z_A - z_B) \quad \begin{matrix} \leftarrow \rho \text{ en } \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ \leftarrow z \text{ en m} \\ \leftarrow g \text{ en } \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \end{matrix}$ </div> |

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo de cours : Pression et force pressante

1. D'après la loi fondamentale de la statique des fluides :
 $P - P_{atm} = \rho_{eau} \times g \times (0 - z)$ avec $z = -15$ m.
 Il vient : $P = P_{atm} + \rho \times g \times (-z)$.
 $P = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa} + 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \times 15 \text{ m}$
 $P = 2,5 \times 10^5 \text{ Pa}$.
 À 15 m de profondeur, la pression est $2,5 \times 10^5 \text{ Pa}$.

2. Soit F , la valeur de la force pressante exercée par l'eau sur le masque du plongeur :
 $F = P \times S$ avec $S = 100 \text{ cm}^2$; soit $F = 2,5 \times 10^5 \text{ Pa} \times 100 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 Il vient $F = 2,5 \times 10^3 \text{ N}$.
 L'eau exerce une force pressante sur le masque de valeur $2,5 \times 10^3 \text{ N}$.

Flash test

1. B ; 2. A ; 3. B ; 4. A et C.

Activité 1

expérimentale Poussée d'Archimède

Capacités exigibles

- Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède.
- Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède.
- Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.
- Utiliser un dispositif permettant d'étudier la poussée d'Archimède.

Investigation

1 Étapes de la démarche d'investigation

1^{re} étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

On repère :

- les caractéristiques de la poussée d'Archimède (direction, sens et valeur de cette force) dans le doc. **A** ;
- le rôle du dynamomètre (un dispositif qui permet de mesurer la valeur d'une force) dans le doc. **B** ;
- la liste du matériel disponible.

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire adapté

L'expression $F_p = \rho_{liquide} \times V_{im} \times g$ de la valeur de la poussée d'Archimède exercée par un liquide sur corps immergé est-elle expérimentalement vérifiée ?

3^e étape : Émettre une hypothèse permettant d'y répondre

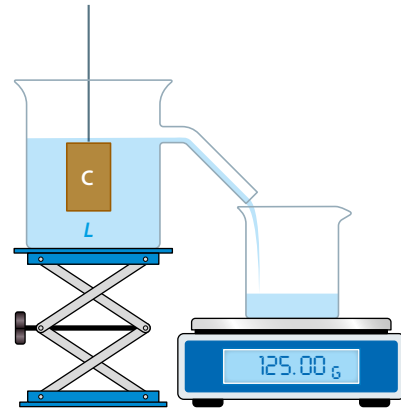
Il faut vérifier si :

- à masse volumique constante, la valeur de la poussée d'Archimède est proportionnelle au volume du corps immergé V_{im} ;
- pour un volume immergé constant, la valeur de la poussée d'Archimède est proportionnelle à la masse volumique $\rho_{liquide}$ du liquide.

4^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'expression de la valeur de la force

Mesure 1 : détermination du volume du corps immergé V_{im}

- On remplit à ras bord un vase de Boudreau avec un liquide L de masse volumique $\rho_{liquide}$.
- On immerge totalement dans le liquide L un corps solide C de volume V_{im} et on récupère, dans un bécher préalablement taré, le liquide qui déborde du vase.
- On pèse le liquide recueilli à l'aide d'une balance et on note sa masse $m_{liquide}$.



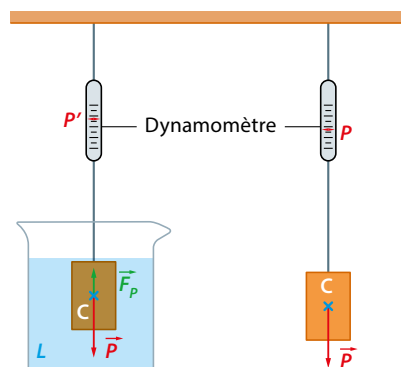
- On détermine ainsi le volume V_{im} du corps immergé par la

$$\text{relation : } V_{im} = \frac{m_{liquide}}{\rho_{liquide}}$$

Remarque : il est aussi possible de déterminer le volume V_{im} en immergeant totalement le corps solide dans une éprouvette graduée et en notant l'augmentation du volume. Cependant, la mesure est moins précise. Par ailleurs, le volume et les dimensions du corps peuvent être tels qu'il n'est pas possible de l'immerger dans une éprouvette graduée.

Mesure 2 : détermination de la valeur de la poussée d'Archimède F_p

- On mesure la valeur P' du poids apparent du corps C immergé dans le liquide L à l'aide d'un dynamomètre.
- On mesure la valeur P du poids réel du corps C placé dans l'air dont on néglige la masse volumique et de ce fait la poussée d'Archimède.



- Le dynamomètre de gauche mesure la valeur de $\vec{F}_p + \vec{P}$ et celui de droite la valeur du poids \vec{P} du corps. Il vient que la valeur de la poussée d'Archimède est donnée par la relation : $F_p = P - P'$.
- Exemples de mesures :
 - Influence du volume V_{im} du corps C immergé :

| Le liquide L est l'eau de masse volumique : $\rho_{\text{liquide}} = 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. | | |
|--|--|---|
| Volume V_{im} (m^3) | Valeur de la poussée d'Archimède F_p (N) | Rapport $\frac{F_p}{V_{im}}$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$) |
| $5,0 \times 10^{-6}$ | $5,1 \times 10^{-2}$ | $1,0 \times 10^4$ |
| $10,0 \times 10^{-6}$ | $9,8 \times 10^{-2}$ | $0,98 \times 10^4$ |
| $30,0 \times 10^{-6}$ | $3,1 \times 10^{-1}$ | $1,0 \times 10^4$ |

On constate que F_p est proportionnelle à V_{im} .

- Influence de la masse volumique ρ_{liquide} du liquide :

| Le corps immergé à un volume : $V_{im} = 10,0 \text{ cm}^3 = 10,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ | | |
|--|--|--|
| Masse volumique ρ_{liquide} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | Valeur de la poussée d'Archimède F_p (N) | Rapport $\frac{F_p}{\rho_{\text{liquide}}}$ ($\text{N} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) |
| 1 000 | $9,8 \times 10^{-2}$ | $9,8 \times 10^{-5}$ |
| 780 | $7,7 \times 10^{-2}$ | $9,9 \times 10^{-5}$ |

On constate que F_p est proportionnelle à ρ_{liquide} .

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|----------------------------|--|---|---|---|---|
| S'approprier | Repérer, d'après l'expression de F_p , que la valeur de la poussée d'Archimède est proportionnelle au volume immergé V_{im} du corps et à la masse volumique ρ_{liquide} du liquide dans lequel le corps est immergé. | | | | |
| Analyser -raisonner | <ul style="list-style-type: none"> – Faire un bilan des forces extérieures appliquées à un corps immergé dans un fluide. Faire un schéma. – En déduire l'expression de la valeur F_p de la poussée d'Archimède en fonction de la valeur des forces mesurée avec un dynamomètre : $F_p = P - P'$. – Ne faire varier qu'un paramètre à la fois : le volume du corps immergé puis la masse volumique du liquide dans lequel on immerge le corps. | | | | |
| Réaliser | <ul style="list-style-type: none"> – Utiliser le dynamomètre le plus sensible adapté aux valeurs des forces à mesurer. – Utiliser de préférence le vase de Boudreau et une balance pour déterminer le volume du corps immergé. – Présenter les résultats des mesures clairement, sous forme de tableau ou de graphique. | | | | |
| Valider | <ul style="list-style-type: none"> – Confronter l'expression de la valeur F_p de la poussée d'Archimède aux résultats expérimentaux obtenus. – Retrouver la valeur de l'intensité de pesanteur g. | | | | |

Activité 2 expérimentale Écoulement d'un fluide

p. 280

Capacités exigibles

- Exploiter la conservation du débit volumique pour déterminer la vitesse d'un fluide incompressible.
- Exploiter la relation de Bernoulli, celle-ci étant fournie, pour étudier qualitativement puis quantitativement l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent.

5^e étape : Noter les informations, les interpréter et conclure

La valeur de la poussée d'Archimède est proportionnelle à V_{im} et à ρ_{liquide} : $F_p = k \times \rho_{\text{liquide}} \times V_{im}$.

L'exploitation des mesures des tableaux ci-dessus montre que le coefficient de proportionnalité k est égal à l'intensité de pesanteur g . Finalement, on a bien pour expression : $F_p = \rho_{\text{liquide}} \times V_{im} \times g$.

2 La valeur de la poussée d'Archimède, $F_p = \rho_{\text{liquide}} \times V_{im} \times g$, est proportionnelle à la masse volumique du fluide dans lequel le corps est immergé.

Comme $\frac{\rho_{\text{eau}}}{\rho_{\text{air}}} = \frac{1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 7,7 \times 10^2$, pour un même corps immergé dans l'eau et dans l'air, la poussée d'Archimède est $7,7 \times 10^2$ plus intense dans l'eau que dans l'air.

Un pas vers le cours

3 La poussée d'Archimède exercée par un fluide sur un corps immergé est une force verticale, orientée vers le haut dont la valeur a pour expression :

$F_p = \rho_{\text{liquide}} \times V_{im} \times g$ avec F_p en newton (N), ρ_{liquide} la masse volumique du liquide en kilogramme par mètre cube ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), V_{im} le volume immergé d'un corps dans ce fluide en mètre cube (m^3) et g l'intensité de la pesanteur en newton par kilogramme ($\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$).

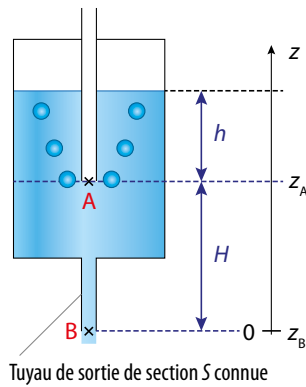
Commentaire sur la stratégie pédagogique proposée

La poussée d'Archimède est pour l'élève une notion qualitativement intuitive. L'approche par une démarche d'investigation semble bien adaptée à l'étude quantitative de cette force.

Pratique expérimentale

1 Le dispositif utilisé est celui représenté ci-dessous :

- Vase de Mariotte rempli d'eau avec un long tube en verre qui permet de créer un appel d'air
- Chronomètre
- Éprouvette graduée
- Récipient de récupération de l'eau
- Règle graduée



- Pour chacune des expériences réalisées :
 - le diamètre du tuyau de sortie est $d = 3,0 \text{ mm}$;
 - l'eau qui s'écoule est recueillie dans une éprouvette graduée. On recueille à chaque fois un volume de liquide écoulé $V = 200 \text{ mL}$;
 - on mesure au chronomètre pour chaque valeur de H choisie, la durée Δt nécessaire à l'écoulement du volume $V = 200 \text{ mL}$ du liquide.

• Exemples de résultats :

| | Expérience 1 | Expérience 2 | Expérience 3 |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| $H = z_A - z_B \text{ (cm)}$ | 6,7 | 10,5 | 13,8 |
| $\Delta t \text{ (s)}$ | 24,0 | 22,0 | 19,0 |

2 Pour calculer la valeur v_B de la vitesse d'écoulement du fluide à partir des mesures, on utilise les données du doc. A sur le débit volumique D_v :

$$D_v = \frac{V}{\Delta t} = S \times v_B.$$

$$\text{On en déduit } v_B = \frac{V}{S \times \Delta t}.$$

Détermination de S : le tube est cylindrique de diamètre $d = 3,0 \text{ mm}$, donc $S = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2$.

Avec $V = 200 \text{ mL} = 2,00 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, on obtient :

| | Expérience 1 | Expérience 2 | Expérience 3 |
|---|--------------|--------------|--------------|
| $H = z_A - z_B \text{ (cm)}$ | 6,7 | 10,5 | 13,8 |
| $\Delta t \text{ (s)}$ | 24,0 | 22,0 | 19,0 |
| $v_B = \frac{V}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \Delta t}$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1,2 | 1,3 | 1,5 |

3 a. En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée entre A et B, le long d'une ligne de courant du fluide incompressible s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B.$$

b. • Les pressions aux positions A et B sont égales à la pression atmosphérique et la valeur de la vitesse en A est nulle. La relation de Bernoulli devient :

$$\rho \times g \times z_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B.$$

Il vient donc $v_B = \sqrt{2g \times (z_A - z_B)}$ soit $v_B = \sqrt{2g \times H}$.

• Comparons maintenant les valeurs de $v_{B_{\text{exp}}}$ obtenues expérimentalement et celles de $v_{B_{\text{th}}}$ données par la relation de Bernoulli :

| | Expérience 1 | Expérience 2 | Expérience 3 |
|--|--------------|--------------|--------------|
| $v_{B_{\text{exp}}} = \frac{V}{S \times \Delta t}$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1,2 | 1,3 | 1,5 |
| $v_{B_{\text{th}}} = \sqrt{2g \times H}$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1,1 | 1,4 | 1,6 |

Aux imprécisions de mesures près, la relation de Bernoulli est vérifiée.

4 En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée entre les positions A et B, le long d'une ligne de courant d'un fluide incompressible s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B.$$

On admet que la valeur v_A de la vitesse d'écoulement de l'eau à la surface supérieure libre du château d'eau est nulle et la pression $P_A = P_{\text{atm}}$. La relation de Bernoulli devient :

$$\rho \times g \times z_A + P_{\text{atm}} = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B.$$

Pour calculer la valeur v_B de la vitesse de l'eau à la base du château d'eau, il faut connaître la différence d'altitude $z_A - z_B$ entre la surface de l'eau et la base du château d'eau ainsi que la pression de l'eau à la base du château d'eau.

Un pas vers le cours

5 La relation de Bernoulli relie pour toute position du fluide appartenant à une même ligne de courant, la pression P , la valeur v de la vitesse d'écoulement du fluide et la coordonnée verticale z de la position de cet élément. En appliquant cette relation entre deux positions judicieusement choisies, on peut isoler la grandeur P , V ou z recherchée.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Cette activité expérimentale est relativement facile à mettre en place et le matériel assez accessible. Pour limiter les dépenses, on peut fabriquer au laboratoire des vases de Mariotte.

Quelle que soit l'origine du vase de Mariotte, il est préférable que le tuyau de sortie soit fermé par une pince de Mohr plutôt que par un robinet. La présence d'un robinet modifie l'écoulement et conduit à des mesures incorrectes.

Le diamètre intérieur du tuyau d'écoulement peut être mesuré en remplissant une longueur connue de ce tuyau d'eau, et en pesant l'eau qu'il contient.

Capsule vidéo de cours : La relation de Bernoulli

QCM

1. A ; 2. A et C ; 3. C ; 4. B ; 5. B ; 6. A et C ; 7. B ; 8. C ; 9. B ; 10. A.

3 CORRIGÉ Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède

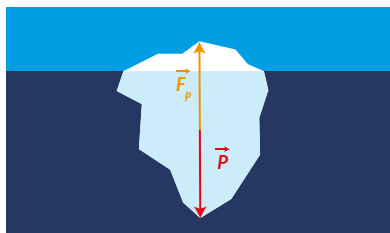
1. Un corps est soumis à la poussée d'Archimède s'il est en partie ou totalement immergé dans un ou plusieurs fluides.
2. La poussée d'Archimède, dans un fluide au repos, est due à la différence de pression entre les parties inférieure et supérieure du corps immergé.

4 Comprendre l'origine de la poussée d'Archimède

1. Les flèches schématisées représentent les forces pressantes exercées par le fluide sur le corps immergé.
2. La somme de ces forces correspond à la poussée d'Archimède exercée par le fluide sur le corps immergé.

5 CORRIGÉ Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède

1.



Remarque : rigoureusement, le point d'application de la poussée d'Archimède \vec{F}_p exercée par l'eau sur l'iceberg est le centre de masse C de la partie immergée de l'iceberg.

Le point d'application du poids \vec{P} de l'iceberg est le centre de masse G de l'iceberg.

Lorsque le corps est totalement immergé dans un même fluide, C et G sont confondus.

2. Expression vectorielle du poids : $\vec{P} = m_{ice} \vec{g}$

$$\vec{P} = \rho_{ice} \times V_{ice} \times \vec{g}$$

Valeur du poids : $P = \rho_{ice} \times V_{ice} \times g$

$$P = 9,2 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 7,0 \times 10^4 \text{ m}^3 \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$P = 6,3 \times 10^8 \text{ N}$$

Expression vectorielle de la poussée d'Archimède :

$$\vec{F}_p = -\rho_{eau} \times V_{im} \times \vec{g}$$

Valeur de la poussée d'Archimède :

$$F_p = \rho_{eau} \times V_{im} \times g$$

$$F_p = 1,02 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 6,3 \times 10^4 \text{ m}^3 \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$F_p = 6,3 \times 10^8 \text{ N}$$

Les deux forces ont la même valeur, ce qui est en accord avec un iceberg en équilibre.

6 Définir la poussée d'Archimède

1. La poussée d'Archimède est verticale, orienté de bas en haut, de valeur $F_p = \rho_{fluide} \times V_{im} \times g$.

$$\vec{F}_p = -\rho_{fluide} \times V_{im} \times \vec{g}$$

- ρ_{fluide} est la masse volumique du fluide dans lequel est immergé le corps, en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- V_{im} est le volume de la partie immergée du corps, en m^3 ;
- g est l'intensité de la pesanteur, en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ ou $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

7 CORRIGÉ Définir le débit volumique d'un fluide

1. Un fluide s'écoule en régime permanent indépendant du temps ou stationnaire, si la valeur v de sa vitesse en chaque position est indépendante du temps.

2. En régime permanent indépendant du temps, lorsqu'un volume V de fluide s'écoule au travers d'une section pendant une durée Δt , le débit volumique D_v est donné par : $D_v = \frac{V}{\Delta t}$ où V en m^3 et Δt en s.

8 Exprimer le débit volumique d'un fluide

1. Le volume coloré représente le volume V d'un élément de fluide qui traverse une section de surface S et qui se déplace d'une distance ℓ pendant la durée Δt .

2. Avec les notations du schéma, $D_v = \frac{V}{\Delta t} = \frac{S \times \ell}{\Delta t}$.

9 CORRIGÉ Traduire la conservation d'un débit volumique

1. Au cours d'un écoulement en régime permanent indépendant du temps, le débit volumique d'un fluide incompressible se conserve. Les débits volumiques aux extrémités du tube sont donc identiques.

2. Par définition, $D_v = \frac{V}{\Delta t}$.

Or $V = S \times \ell$. D'où $D_v = S \times v$.

Comme $D_{v1} = D_{v2}$, $S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$.

Ainsi $v_2 = \frac{S_1 \times v_1}{S_2}$.

$$v_2 = \frac{30 \text{ cm}^2 \times 2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{10 \text{ cm}^2} = 6,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

10 Comparer des valeurs de vitesse

Au cours d'un écoulement en régime permanent indépendant du temps, le débit volumique d'un fluide incompressible se conserve, donc $D_{v1} = D_{v2}$.

Or $D_v = S \times v$, donc $S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$.

Si $S_1 > S_2$ alors $v_1 < v_2$ et inversement.

En conséquence, dans toutes les situations proposées, $v_1 < v_2$.

11 CORRIGÉ Décrire les grandeurs physiques de la relation de Bernoulli

1. Les grandeurs qui interviennent dans la relation de Bernoulli sont : la masse volumique du fluide ρ , en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, la valeur de la vitesse d'écoulement v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, l'intensité de la pesanteur g en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (ou $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$), la coordonnée verticale z en m repérée sur un axe vertical ascendant et la pression P du fluide en Pa.

2. En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée le long d'une ligne de courant au fluide incompressible entre A et B s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B$$

Comme la ligne de courant est horizontale, $z_A = z_B$.

La relation de Bernoulli devient :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + P_B$$

12 Exploiter qualitativement la relation de Bernoulli

a. Si $z_A = z_B$, la relation de Bernoulli s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + P_B$$

Dans ce cas : « Si $v_A > v_B$ la pression P_A à la position A est inférieure à la pression P_B à la position B. »

b. Si $P_A = P_B$, la relation de Bernoulli s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B$$

Dans ce cas : « Si $v_A < v_B$ alors la coordonnée verticale z_A est supérieure à la coordonnée verticale z_B . »

c. Si $v_A = v_B$, la relation de Bernoulli s'écrit :

$$\rho \times g \times z_A + P_A = \rho \times g \times z_B + P_B$$

Dans ce cas : « Si $z_A < z_B$, alors la pression P_A à la position A est supérieure à la pression P_B à la position B. »

13 Exploiter la relation de Bernoulli (1)

On extrait la pression P_B de la relation de Bernoulli appliquée entre A et B :

$$P_B = \rho \times g \times (z_A - z_B) + P_A - \rho \times \left(\frac{v_B^2}{2} - \frac{v_A^2}{2} \right).$$

Or ici $z_A = z_B$, donc $P_B = P_A - \rho \times \left(\frac{v_B^2}{2} - \frac{v_A^2}{2} \right).$

$$P_B = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$- 1,03 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times \left(\frac{(2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{2} - \frac{(1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{2} \right)$$

$$P_B = 9,8 \times 10^4 \text{ Pa}.$$

14 Exploiter la relation de Bernoulli (2)

En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli, le long d'une ligne de courant entre A et B, appliquée à de l'eau, fluide incompressible, s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B.$$

On extrait v_B soit :

$$v_B = \sqrt{v_A^2 + 2g \times (z_A - z_B) + 2 \times \frac{P_A - P_B}{\rho_{\text{eau}}}}$$

$$v_B = \sqrt{(2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 + 2 \times 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} (0,50 \text{ m} - 0,75 \text{ m}) + 2 \times \frac{1,20 \times 10^5 \text{ Pa} - 1,10 \times 10^5 \text{ Pa}}{1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}}$$

$$v_B = 4,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

15 Appliquer la relation de Bernoulli

En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée le long d'une ligne de courant à un fluide incompressible, entre A et B s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B.$$

Pour $z_A = z_B$, la relation devient :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + P_B.$$

Or, d'après le schéma, $v_A > v_B$, donc $P_B > P_A$.

Le manomètre 1 est associé à la position B alors que le manomètre 2 est associé à la position A.

16 Tester la relation de Bernoulli

En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée le long d'une ligne de courant à un fluide incompressible, entre A et B s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B.$$

Pour $z_A = z_B$, la relation devient :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + P_B.$$

Comme $v_A > v_B$, en A, la pression P_A sera plus faible que celle P_B qui règne en B.

Or $P_B = P_{\text{atm}}$ et donc $P_A < P_{\text{atm}}$.

À la position A apparaît une dépression par rapport au reste de l'enceinte. L'huile essentielle du vaporisateur est aspirée et jaillit sous forme de gouttelettes.

Exercices

S'entraîner

p. 290

17 Connaître les critères de réussite

Du yaourt au miel

1. Le débit volumique d'écoulement du miel dans la cuve s'exprime par $D_v = \frac{V}{\Delta t}$.

$$D_v = \frac{41 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{2,0 \times 60 \text{ s}} \text{ soit } D_v = 3,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. On a $D_v = S \times v_s$ d'où $v_s = \frac{D_v}{S}$ avec $S = \pi \times \frac{d^2}{4}$ (aire d'un cercle de diamètre d).

$$v_s = \frac{4D_v}{\pi \times d^2} \text{ soit } v_s = \frac{43,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{(12,5 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2} = 2,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur v_s de la vitesse d'écoulement du miel en S est $2,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée le long d'une ligne de courant au miel considéré comme un fluide incompressible, entre A et S s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{miel}} \times v_A^2 + \rho_{\text{miel}} \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho_{\text{miel}} \times v_S^2 + \rho_{\text{miel}} \times g \times z_S + P_S.$$

La valeur de la vitesse d'écoulement du miel en A est négligeable devant celle en S (énoncé). De plus $P_A = P_S = P_{\text{atm}}$. La relation devient :

$$\rho_{\text{miel}} \times g \times z_A = \frac{1}{2} \rho_{\text{miel}} \times v_S^2 + \rho_{\text{miel}} \times g \times z_S.$$

$$\text{D'où } z_A = \frac{v_S^2}{2g} + z_S; \text{ soit } z_A = \frac{(2,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{2 \times 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}} + 0,50 \text{ m}.$$

La coordonnée verticale de A est $0,90 \text{ m}$.

18 Mon beau sapin

1. Le schéma en coupe est donné ci-contre, avec A le centre de masse de la partie immergée.

2. La valeur de la poussée d'Archimède qui s'exerce sur le tronc : $F_p = \rho_{\text{eau}} \times V_{\text{im}} \times g$.

3. Le tronc est considéré immobile dans le référentiel supposé galiléen lié à l'eau de la rivière. D'après le principe d'inertie, la somme des forces se compensent : $\vec{P} + \vec{F}_p = \vec{0}$.

4. La relation $\vec{P} + \vec{F}_p = \vec{0}$ projetée sur un axe vertical orienté vers le haut conduit à $-P + F_p = 0$.

$$F_p = P \text{ soit } \rho_{\text{eau}} \times V_{\text{im}} \times g = m \times g.$$

Il vient $\rho_{\text{eau}} \times V_{\text{im}} = m$ avec $m = \rho_{\text{bois}} \times V_{\text{bois}}$ et

$$V_{\text{bois}} = \pi \times \frac{D^2}{4} \times \ell.$$

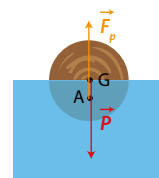
De plus, d'après les données du texte, le tronc est immergé d'une hauteur $h = \frac{D}{2}$. Le volume du tronc immergé est donc la moitié de celui du bois :

$$V_{\text{im}} = \frac{V_{\text{bois}}}{2}.$$

$$\text{Donc } \rho_{\text{eau}} \times \pi \times \frac{D^2}{8} \times \ell = \rho_{\text{bois}} \times \pi \times \frac{D^2}{4} \times \ell;$$

$$\text{soit } \rho_{\text{bois}} = \frac{\rho_{\text{eau}}}{2}.$$

$\rho_{\text{bois}} = 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, cette masse volumique est comprise entre 400 et $580 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Le bois de ce sapin est sec.



19 Assumptions¹ and Bernoulli's equation

Erratum : erreur dans le spécimen corrigée dans le manuel de l'élève. La question 1. devient :

1. Which energies are considered in the Bernoulli's equation?

Traduction : Hypothèses et équation de Bernoulli

L'équation de Bernoulli est basée sur le principe que tout gain d'énergie cinétique ou potentielle par un élément de fluide est le fait d'un travail extérieur exercé sur cet élément de fluide par un autre fluide non visqueux.

On suppose alors :

– qu'il n'y a pas de force dissipative, sans quoi de l'énergie thermique serait générée ;

– que l'écoulement est en régime permanent indépendant du temps, sans quoi les énergies ne seraient pas les mêmes en tout point d'un élément de fluide ;

– que le fluide est incompressible, sans quoi des volumes identiques n'auraient pas nécessairement la même masse.

Une manière d'écrire l'équation de Bernoulli est la suivante :

$$\frac{1}{2}\rho \times v^2 + \rho \times g \times z + P = \text{constante.}$$

La constante est propre à chaque élément de fluide, mais pour un écoulement en régime permanent indépendant du temps d'un fluide non compressible sur une même ligne de courant,

la quantité $\frac{1}{2}\rho \times v^2 + \rho \times g \times z + P$ sera la même en tout point de cet écoulement.

1. Quelles sont les énergies prise en compte dans l'équation de Bernoulli ?

2. Citer deux hypothèses concernant le fluide qui permettent d'appliquer l'équation de Bernoulli.

3. La valeur de la constante de l'équation de Bernoulli est-elle indépendante de tout paramètre ?

Réponses

1. Dans l'équation de Bernoulli, on considère les énergies cinétique et potentielle d'un élément de fluide.

2. Les hypothèses concernant un fluide qui vérifie la relation de Bernoulli sont les suivantes :

– le fluide doit avoir un écoulement en régime permanent indépendant du temps ;

– le fluide doit être incompressible (masse volumique constante) ;

– le fluide ne doit pas être soumis à des forces dissipatives.

3. Dans la relation de Bernoulli exprimée par :

$\frac{1}{2}\rho \times v^2 + \rho \times g \times z + P = \text{constante}$, la constante dépend de la nature du fluide (ρ), de l'intensité de la pesanteur et de la ligne de courant sur laquelle la relation est appliquée. Cette constante n'est donc pas indépendante de tout paramètre.

20 Chauffage central

1. Débit volumique du fluide dans la canalisation du rez-de-chaussée : $D_v = v_0 \times S_0$.

Comme la canalisation est cylindrique de diamètre d_0 , la surface de sa section est $S_0 = \pi \times \frac{d_0^2}{4}$.

L'expression du débit volumique devient donc :

$$D_v = v_0 \times \pi \times \frac{d_0^2}{4}. \text{ Il vient } d_0 = \sqrt{\frac{4D_v}{v_0}};$$

$$\text{donc } d_0 = \sqrt{\frac{4,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}} \text{ soit } d_0 = 1,8 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

La canalisation du rez-de-chaussée a un diamètre de $1,8 \times 10^{-2}$ m ou 18 mm.

2. L'eau étant incompressible, et le régime étant permanent indépendant du temps, le débit volumique est constant quel que

soit l'endroit du circuit. Il est donc égal à $4,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au premier étage.

3. La conservation du débit volumique permet d'écrire :

$$D_v = v_0 \times S_0 = v_1 \times S_1.$$

$$\text{Il vient } D_v = v_1 \times \pi \times \frac{d_1^2}{4}; \text{ donc } v_1 = \frac{4D_v}{\pi \times d_1^2}; v_1 = \frac{4 \times 4,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{\pi \times (15 \times 10^{-3} \text{ mm})^2}$$

$$v_1 = 2,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur de la vitesse de l'eau dans les canalisations du premier étage est $2,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée à l'eau, fluide incompressible, le long d'une ligne de courant s'écrit :

$$\frac{1}{2}\rho_{\text{eau}} \times v_0^2 + \rho_{\text{eau}} \times g \times z_0 + P_0 = \frac{1}{2}\rho_{\text{eau}} \times v_1^2 + \rho_{\text{eau}} \times g \times z_1 + P_1$$

$$D'où P_1 = \frac{1}{2}\rho_{\text{eau}} \times (v_0^2 - v_1^2) + \rho_{\text{eau}} \times g \times (z_0 - z_1) + P_0$$

Or $(z_0 - z_1) = -h_1$. Il vient donc :

$$P_1 = \frac{1}{2}\rho_{\text{eau}} \times (v_0^2 - v_1^2) - \rho_{\text{eau}} \times g \times h_1 + P_0$$

$$P_1 = 0,5 \times 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times (1,3^2 - 2,3^2) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$- 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \times 4,8 \text{ m} + 1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_1 = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

La pression au premier étage est $1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$.

5. Si le chauffage est arrêté, la valeur de la vitesse v du fluide dans les canalisations est nulle. La relation établie précédemment se ramène donc à la relation fondamentale de la statique des fluides :

$$P_{1, \text{été}} = -\rho_{\text{eau}} \times g \times h_1 + P_0$$

$$P_{1, \text{été}} = -1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \times 4,8 \text{ m} + 1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_{1, \text{été}} = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

La pression dans les canalisations au premier étage et en été est $1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$.

6. La pression aux deux niveaux étant pratiquement la même tout au long de l'année, aucune période n'impacte plus qu'une autre la longévité des tuyaux.

21 Souffle au cœur

1. Débit volumique sanguin dans l'artère :

$$D_{v_A} = \frac{V_{\text{fluide}}}{\Delta t} \text{ où } \Delta t = T_{\text{battement}}$$

$$\text{soit } D_{v_A} = \frac{75 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 70 \text{ pulsations par minute}}{60 \text{ s}}$$

$$\text{soit } D_{v_A} = 8,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. Le débit volumique dans l'aorte s'exprime aussi par :

$$D_{v_A} = S_{\text{aorte}} \times v_A.$$

L'artère étant cylindrique, la surface de sa section est :

$$S_{\text{aorte}} = \pi \times \frac{D^2}{4} \times v_A \text{ et donc } D = 2 \sqrt{\frac{D_{v_A}}{\pi \times v_A}};$$

$$\text{soit } D = 2 \sqrt{\frac{8,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{\pi \times 0,31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

$$\text{soit } D = 1,9 \times 10^{-2} \text{ m} = 19 \text{ mm.}$$

3. Le sang étant assimilé à un fluide incompressible qui s'écoule en régime permanent indépendant du temps, le débit volumique se conserve : $D_{v_A} = D_{v_R}$.

$$\pi \times \frac{D^2}{4} \times v_A = \pi \times \frac{d^2}{4} \times v_R$$

$$v_R = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \times v_A \text{ et } d = \frac{D}{5}$$

$$v_R = (5)^2 \times 0,31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

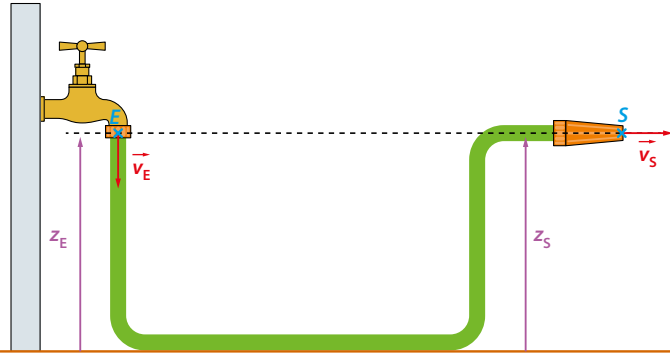
$$v_R = 7,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur de la vitesse du sang dans le rétrécissement de l'aorte est $v_R = 7,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. La valeur de la vitesse du sang dans le rétrécissement de l'aorte dépasse $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; un souffle est entendu.

22 À chacun son rythme Tuyau d'arrosage

1. Schéma de l'installation :



2. La pression P_S à la sortie du tuyau est celle de l'atmosphère (extrémité libre de la lance d'arrosage en relation avec l'air extérieur) ; $P_S = P_{\text{atm}}$.

3. Débit volumique en E : $D_{v_E} = S_E \times v_E$.

Comme le tuyau est cylindrique de diamètre d_E :

$$S_E = \pi \times \frac{d_E^2}{4} \text{ et donc } D_{v_E} = \pi \times \frac{d_E^2}{4} \times v_E.$$

On a de la même façon en S : $D_{v_S} = \pi \times \frac{d_S^2}{4} \times v_S$.

4. Le fluide est incompressible et s'écoule en régime permanent indépendant du temps, le débit volumique se conserve : $D_{v_E} = D_{v_S}$;

$$\text{donc } \pi \times \frac{d_E^2}{4} \times v_E = \pi \times \frac{d_S^2}{4} \times v_S ;$$

$$\text{d'où } v_S = \left(\frac{d_E}{d_S} \right)^2 \times v_E ;$$

$$\text{soit } v_S = \left(\frac{15 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} \right)^2 \times 7,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_S = 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur de la vitesse de l'eau à la sortie de la lance d'arrosage est $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée à l'eau, fluide incompressible, le long d'une ligne de courant entre E et S s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_E^2 + \rho_{\text{eau}} \times g \times z_E + P_E = \frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_S^2 + \rho_{\text{eau}} \times g \times z_S + P_S$$

Or $z_E = z_S$, donc la relation précédente devient :

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_E^2 + P_E = \frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_S^2 + P_S$$

$$P_E = P_S + \frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times (v_S^2 - v_E^2) \text{ et comme } P_S = P_{\text{atm}},$$

$$P_E = P_{\text{atm}} + \frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times (v_S^2 - v_E^2)$$

$$P_E = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa} + \frac{1}{2} \times 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times \left[(16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 - (7,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \right].$$

$$P_E = 2,0 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

6. $P_E = 2,0 \times 10^5 \text{ Pa}$ soit $P_E = 2,0 \text{ bar}$.

$P_E < 3,0 \text{ bar}$; en cycle d'arrosage, la pression à l'entrée du tuyau est compatible avec celle que le réducteur de pression peut maintenir.

23 Histoire des sciences Eurêka !

1.a. Masse d'une couronne en or massif : $m = \rho_{\text{or}} \times V_1$.

Le volume de la couronne est donc dans ce cas $V_1 = \frac{m}{\rho_{\text{or}}}$;

$$\text{donc } V_1 = \frac{2,00 \text{ kg}}{1,930 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} \text{ soit } V_1 = 1,04 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{ou } V_1 = 0,104 \text{ L}.$$

b. Si l'orfèvre a substitué 10 % de la masse d'or par de l'argent :
 $m_{\text{argent}} = 0,10 \times m = \rho_{\text{argent}} \times V_{\text{argent}}$

$$m_{\text{or}} = 0,90 \times m = \rho_{\text{or}} \times V_{\text{or}}.$$

$$V_2 = V_{\text{or}} + V_{\text{argent}} = 0,10 \times \frac{m}{\rho_{\text{argent}}} + 0,90 \times \frac{m}{\rho_{\text{or}}}.$$

$$V_2 = 0,10 \times \frac{2,00 \text{ kg}}{1,050 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} + 0,90 \times \frac{2,00 \text{ kg}}{1,930 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}$$

$$V_2 = 1,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ ou } V_2 = 0,112 \text{ L}.$$

c. La différence de volume recueilli par Archimède lors de son expérience est trop faible pour être perçue à l'œil nu faute de pièce de verrerie de bonne précision à son époque.

2. a. Poussée d'Archimède $\vec{F}_{p_1} = -\rho_{\text{eau}} \times V_1 \times \vec{g}$.

Cette force est verticale, dirigée vers le haut et a pour valeur

$$F_{p_1} = \rho_{\text{eau}} \times V_1 \times g.$$

$$F_{p_1} = 1,000 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 1,04 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$F_{p_1} = 1,02 \text{ N}.$$

b. Pour une couronne dans laquelle l'orfèvre a substitué 10 % de la masse d'or par de l'argent :

$$F_{p_2} = \rho_{\text{eau}} \times V_2 \times g$$

$$F_{p_2} = 1,000 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 1,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$F_{p_2} = 1,10 \text{ N}.$$

3. Valeur du poids de la couronne (en or pur ou en alliage puisque la masse est la même dans les deux situations) : $P = m \times g$

$$P = 2,00 \text{ kg} \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$P = 19,6 \text{ N}.$$

4. La couronne et l'objet en or massif sont soumis chacun :

– à leur poids $\vec{P} = m \times \vec{g}$;

– à la poussée d'Archimède $\vec{F}_p = -\rho_{\text{eau}} \times V \times \vec{g}$.

Ces deux forces ont même direction et des sens opposés.

La résultante des forces qui s'exercent sur chaque objet est $\Sigma \vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_p$.

Une projection de ces forces sur un axe vertical orienté vers le bas conduit à $\Sigma F = P - F_p$.

Cette résultante ΣF est appelée poids apparent de l'objet immergé.

À gauche, le poids apparent a pour valeur :

$$\Sigma F_G = 19,6 \text{ N} - 1,10 \text{ N} \text{ soit } \Sigma F_G = 18,5 \text{ N}.$$

À droite, le poids apparent a pour valeur :

$$\Sigma F_D = 19,6 \text{ N} - 1,02 \text{ N} \text{ soit } 18,6 \text{ N}.$$

Le poids apparent est donc plus faible à gauche qu'à droite : la balance penche à droite, ce qui permet de découvrir la supercherie. Remarque : il faudrait quand même une très faible masse pour rétablir l'équilibre, environ 8 mg, ce qui demande une balance de grande précision.

24 Résolution de problème Jet d'eau

1^{re} étape : S'approprier la question posée

Il s'agit de vérifier, si la hauteur de l'eau atteinte par le jet d'eau du roi Fahd à Djeddah en Arabie Saoudite peut atteindre 312 m de hauteur.

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. Le doc. A indique la hauteur d'eau atteinte par le jet pour une vitesse d'éjection de l'eau donnée.

2. À l'aide des données, on connaît l'évolution de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.

3^e étape : Dégager la problématique

Comment déterminer la hauteur de l'eau atteinte par le jet d'eau du roi Fahd par application de la relation de Bernoulli ?

4^e étape : Construire la réponse

1. Écrire la relation de Bernoulli le long d'une ligne de courant, entre la position A (sortie de l'eau du tuyau) et la position B (extrémité du jet), en considérant l'eau comme un fluide incompressible et en admettant que le régime est permanent indépendant du temps.
2. Déterminer la pression P_A à l'altitude $z_A = 0$ m.
3. Évaluer la pression P_B à l'altitude $z_B = h$.
4. Constater qu'à l'altitude $z_B = h$, la valeur de la vitesse v_B de l'eau est nulle.
5. Calculer l'altitude maximale h atteinte par l'eau dans ces conditions.
6. Comparer h à la valeur annoncée dans le doc. **A**.

5^e étape : Répondre

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

On cherche à vérifier, si la hauteur de l'eau atteinte par le jet d'eau du roi Fahd à Djeddah en Arabie Saoudite peut atteindre 312 m de hauteur.

- Mettre en forme la réponse.

En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée au fluide incompressible, le long d'une ligne de courant entre les positions A et B s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_A^2 + \rho \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B$$

La pression P_A à l'altitude $z_A = 0$ m est :

$$P_A = P_0 = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

La pression P_B à l'altitude $z_B = h$ est donnée par la relation

$$P_B = P_0 \times e^{-k \times h}.$$

Pour $z_B = h = 312$ m,

$$P_B = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa} \times e^{(-1,14 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \times 312 \text{ m})}$$

$$P_B = 9,75 \times 10^4 \text{ Pa.}$$

La valeur de la vitesse de l'eau éjectée en A est $v_A = 375 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ soit $v_A = 104 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La valeur de la vitesse de l'eau au sommet du jet a pour valeur $v_B = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

En reportant ces données dans la relation de Bernoulli écrite précédemment, on obtient :

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_A^2 + P_A = \rho_{\text{eau}} \times g \times h + P_B$$

$$\text{soit } h = \frac{1}{\rho_{\text{eau}} \times g} \times \left(\frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_A^2 + P_A - P_B \right)$$

$$\text{ou encore } h = \frac{v_A^2}{2g} + \frac{P_A - P_B}{\rho_{\text{eau}} \times g}$$

$$\text{soit } h = \frac{(104 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{2 \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}} + \frac{1,01 \times 10^5 \text{ Pa} - 9,75 \times 10^4 \text{ Pa}}{1,00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$h = 552 \text{ m.}$$

La hauteur déterminée par ce modèle ne tient pas compte des frottements entre l'eau et le fluide.

Elle est bien plus faible en réalité.

25 Quand le vent souffle

1.a. Comme l'air s'écoule en régime permanent indépendant du temps et qu'il est supposé incompressible, le débit volumique se conserve :

$$D_{v_A} = D_{v_B}.$$

b. Le débit volumique s'exprime par $D_v = S \times v$.

On déduit de la question précédente : $S_A \times v_A = S_B \times v_B$.

Or $S_A = d_A \times H$ et $S_B = d_B \times H$ où H est la hauteur des immeubles.

$$d_A \times H \times v_A = d_B \times H \times v_B$$

$$v_B = \frac{d_A}{d_B} \times v_A$$

$$v_B = \frac{80,0 \text{ m}}{60,0 \text{ m}} \times 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$v_B = 133 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

2.a. En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée le long d'une ligne de courant, entre A et B, au fluide incompressible, s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \times v_A^2 + \rho_{\text{air}} \times g \times z_A + P_A = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \times v_B^2 + \rho_{\text{air}} \times g \times z_B + P_B$$

Or $z_A = z_B$ donc la relation précédente devient :

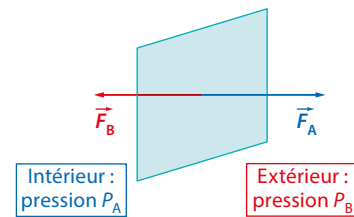
$$\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \times v_A^2 + P_A = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \times v_B^2 + P_B.$$

$$\text{Et donc } P_A - P_B = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \times (v_B^2 - v_A^2).$$

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \times 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times \left(\frac{133}{3,6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \right)^2 - \left(\frac{100}{3,6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \right)^2.$$

$$P_A - P_B = 356 \text{ Pa.}$$

b. On a $P_A > P_B$, or $P = F \times S$. Pour une surface égale, on a donc $F_A > F_B$.



c. Sur les deux faces d'un vitrage de surface S appartenant à l'immeuble 4, s'exerce donc une différence de forces pressantes de valeur :

$$\Delta F = F_A - F_B = (P_A - P_B) \times S.$$

$$\Delta F = (356 \text{ Pa}) \times 6,0 \text{ m}^2.$$

$$\Delta F = 2,1 \times 10^3 \text{ N.}$$

d. On a $P = \Delta F$ soit $m \times g = \Delta F$ d'où $m = \frac{\Delta F}{g}$; soit :

$$m = \frac{2,1 \times 10^3 \text{ N}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} \text{ soit } m = 2,1 \times 10^2 \text{ kg.}$$

Cette force est l'équivalent en valeur, du poids d'une masse de $2,1 \times 10^2 \text{ kg}$. La vitre, si elle n'est pas assez épaisse donc résistante, risque se briser.

26 Sonde de Pitot

1.a. En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée le long d'une ligne de courant, entre O' et B, au fluide incompressible, s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho \times v_O'^2 + \rho \times g \times z_O' + P_O' = \frac{1}{2} \rho \times v_B^2 + \rho \times g \times z_B + P_B$$

Or $z_O' = z_B$ et d'après le schéma $v_O' = v_B = v$.

La relation de Bernoulli se ramène dans cette situation à $P_O' = P_B$.

b. Le long de la ligne de courant 2, pour les positions O et A, on a :

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_O^2 + \rho_{\text{eau}} \times g \times z_O + P_O = \frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_A^2 + \rho_{\text{eau}} \times g \times z_A + P_A$$

Or $z_O = z_A$ et $v_A = 0$.

On en déduit $P_A = P_O + \frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} \times v_O^2$ et donc $P_A > P_O$.

c. Le point O' est très proche de O : $P_{O'} \approx P_O$ et on a montré que : $P_{O'} = P_B$. Le schéma indique $v_O = v_{O'}$.

$$\text{On a donc : } v_O = v_{O'} = \sqrt{\frac{2 \times (P_A - P_B)}{\rho_{\text{eau}}}}.$$

$$2. v = \sqrt{\frac{2 \times 3,30 \times 10^3 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}}$$

$$v = 2,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 9,25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 4,99 \text{ nœuds.}$$

3. Le hors-bord est juste à la limite de l'infraction qui est fixée à 5 nœuds.

Vers le Bac

Préparation à l'écrit

27 CORRIGÉ Une plongée technique

Partie I

1. Valeur de la poussée d'Archimède exercée par l'eau sur le plongeur équipé :

$$F_p = \rho_{\text{eau salée}} \times V \times g$$

$$F_p = 1,03 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,088 \text{ m}^3 \times 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$F_p = 8,9 \times 10^2 \text{ N.}$$

2. À la profondeur de 20 m, le plongeur est soumis :

– à son poids $\vec{P} = m\vec{g}$ de valeur $P = 9,0 \times 10^2 \text{ N}$;

– à la poussée d'Archimède $\vec{F}_p = -\rho_{\text{eau salée}} \times V \times \vec{g}$.

Ces deux forces ont même direction et des sens opposés avec $P > F_p$.

La résultante des forces $\Sigma \vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_p$ est donc verticale orientée vers le bas.

Sous l'effet de ces deux forces, le plongeur ne peut pas rester en équilibre : il se déplace vers le fond.

3. Le plongeur étant initialement immobile, une généralisation de la question précédente conduit à :

– si $P > F_p$, le plongeur descend vers le fond ;

– si $P = F_p$, le plongeur reste en équilibre ;

– si $P < F_p$, le plongeur remonte vers la surface.

$$\text{Or } P = m \times g = \rho_{\text{plongeur}} \times V \times g \text{ et } F_p = \rho_{\text{eau salée}} \times V \times g.$$

On en déduit :

– si $\rho_{\text{plongeur}} > \rho_{\text{eau salée}}$, le plongeur descend vers le fond ;

– si $\rho_{\text{plongeur}} = \rho_{\text{eau salée}}$, le plongeur reste en équilibre ;

– si $\rho_{\text{plongeur}} < \rho_{\text{eau salée}}$, le plongeur remonte vers la surface.

4. Pour que le plongeur soit en équilibre, il faut :

$$\rho_{\text{plongeur}} = \rho_{\text{eau salée}}.$$

Il faut donc diminuer ρ_{plongeur} par rapport à la situation initiale.

$$\text{On a } \rho_{\text{plongeur}} = \frac{m}{V'} \text{ avec } V' = V + V_{\text{air}}.$$

$$\text{Il vient } \frac{m}{V' + V_{\text{air}}} = \rho_{\text{eau salée}}.$$

$$\text{En isolant } V_{\text{air}}, \text{ on a : } V_{\text{air}} = \frac{m}{\rho_{\text{eau salée}}} - V.$$

$$V_{\text{air}} = \frac{92 \text{ kg}}{1,03 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} - 0,088 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{air}} = 0,0013 \text{ m}^3 \text{ ou } V_{\text{air}} = 1,3 \text{ L.}$$

Remarque : en toute rigueur, on ne peut conserver qu'un chiffre significatif pour le résultat de V_{air} , car dans le cas d'une addition ou d'une soustraction, le résultat d'un calcul doit comporter autant de décimales que la grandeur qui en possède le moins (3 décimales ici).

On devrait donc écrire $V_{\text{air}} = 0,001 \text{ m}^3$ ou $V_{\text{air}} = 1 \text{ L}$.

Partie II

1. Comme le fluide est incompressible et s'écoule en régime permanent indépendant du temps, le débit volumique se conserve :

$$D_{v_1} = D_{v_2}.$$

$$S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$$

$$\pi \times \frac{d_1^2}{4} \times v_1 = \pi \times \frac{d_2^2}{4} \times v_2$$

$$v_2 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \times v_1$$

$$v_2 = \left(\frac{6,0 \text{ m}}{3,0 \text{ m}}\right)^2 \times 0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_2 = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. En régime permanent indépendant du temps, la relation de Bernoulli appliquée le long d'une ligne de courant au fluide incompressible s'écrit :

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{eau salée}} \times v_1^2 + \rho_{\text{eau salée}} \times g \times z_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho_{\text{eau salée}} \times v_2^2 + \rho_{\text{eau salée}} \times g \times z_2 + P_2.$$

Dans la situation étudiée, $z_1 = z_2$.

La relation précédente devient :

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{eau salée}} \times v_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho_{\text{eau salée}} \times v_2^2 + P_2.$$

$$\text{Et donc } \Delta P = P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho_{\text{eau salée}} \times (v_1^2 - v_2^2)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times 1,03 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times \left[(0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 - (1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \right].$$

$$\Delta P = -7,0 \times 10^2 \text{ Pa}.$$

La différence de pression entre les deux passages cylindriques de la cavité est $7,0 \times 10^2 \text{ Pa}$.

3. La relation fondamentale de la statique des fluides indique que la pression dans l'eau augmente de 1 bar c'est-à-dire $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ lorsque la profondeur augmente de 10 m.

| Pression (Pa) | Augmentation de profondeur (m) |
|-----------------|--------------------------------|
| 1×10^5 | 10 |
| 700 | Δz |

$$\Delta z = \frac{700 \text{ Pa} \times 10 \text{ m}}{1 \times 10^5 \text{ Pa}} = 7 \times 10^{-2} \text{ m} = 7 \text{ cm.}$$

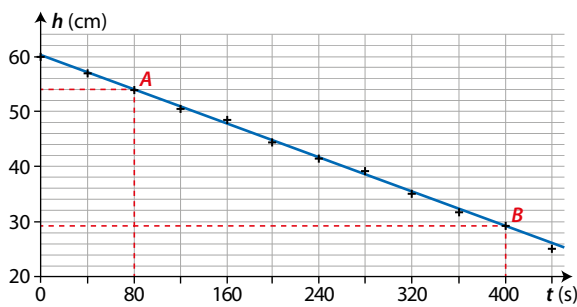
La diminution de la pression de 700 Pa due à la présence d'un courant sous-marin engendre une erreur de mesure de l'ordinateur de plongée de 7 cm de profondeur.

Préparation à l'ECE

La loi de Torricelli

Partie I

1.



On remarque que h est une fonction affine décroissante du temps : c'est bien la preuve que la vidange s'opère à vitesse constante. Le coefficient directeur, en valeur absolue, nous donne la valeur de cette vitesse au point A.

Le coefficient directeur p a pour expression : $p = \frac{h_B - h_A}{t_B - t_A}$

soit $p = \frac{29 \times 10^{-2} \text{ m} - 54 \times 10^{-2} \text{ m}}{400 \text{ s} - 80 \text{ s}} = -7,8 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Une valeur de vitesse étant par définition positive, $v_A = -p$.
Donc $v_A = 7,8 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.a. Comme la valeur de la vitesse v_A et le diamètre D du tuyau sont constants, le débit volumique $D_v = S \times v_A = \pi \times \frac{D^2}{4} \times v_A$ est constant dans le temps. Comme le fluide est incompressible et s'écoule en régime permanent indépendant du temps, le débit volumique se conserve : $D_{vA} = D_{vC} = D_v$.

$$D_v = \pi \times \frac{(20 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{4} \times 7,8 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$D_v = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

b. La conservation du débit volumique conduit à :

$$S \times v_A = s \times v_C \text{ soit aussi : } \pi \times \frac{D^2}{4} \times v_A = \pi \times \frac{d^2}{4} \times v_C.$$

On en déduit :

$$v_C = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \times v_A.$$

$$v_C = \left(\frac{20 \times 10^{-2} \text{ m}}{4,0 \times 10^{-3} \text{ m}}\right)^2 \times 7,8 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_C = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

c. À l'aide d'une éprouvette graduée, on mesure le volume V d'eau qui s'écoule du vase de Mariotte. Un chronomètre permet de mesurer la durée Δt mise pour obtenir ce volume V .

On calcule ainsi le débit volumique sachant que $D_v = \frac{V}{\Delta t}$.

Autre méthode : on mesure à l'aide d'une balance la masse d'eau qui s'est écoulée du vase de Mariotte pendant la durée Δt . Connaissant la masse volumique de l'eau, on remonte à son volume puis le débit volumique.

3.a. On a $v_{C\text{Torr}} = \sqrt{2g \times H}$

$$v_{C\text{Torr}} = \sqrt{2 \times 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \times 20 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$v_{C\text{Torr}} = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. Pour un résultat donné avec deux chiffres significatifs, il y a un bon accord entre le modèle théorique et la détermination expérimentale.

Partie II

On observe sur le nouveau graphique que les points ne sont pas alignés.

La hauteur de chute du fluide décroît de moins en moins vite au fur et à mesure que le récipient se vide. En effet, pour des intervalles de temps égaux, la variation Δh est de plus en plus faible. Cela traduit une diminution de la vitesse d'écoulement et donc un débit volumique de plus en plus faible.

On a une vidange d'un récipient pour lequel le débit volumique n'est pas constant.

Vers l'oral

p. 296

Je m'exprime à l'oral sur

La modélisation de l'écoulement d'un fluide

• **Quelles sont les caractéristiques de la poussée d'Archimède ?**
Lorsqu'un corps est immergé dans un fluide de masse volumique ρ_{fluide} , ce fluide exerce sur le corps une force appelée poussée d'Archimède. Cette force est opposée au poids du fluide déplacé et a pour caractéristiques :

Direction : verticale.
Sens : vers le haut.
Valeur : $F_p = \rho_{\text{fluide}} \times V_{\text{im}} \times g$
avec V_{im} le volume immergé du corps
et g l'intensité de la pesanteur du lieu.

• **Qu'est-ce qu'un régime permanent indépendant du temps ?**
Un fluide s'écoule en régime permanent indépendant du temps (ou régime permanent stationnaire), si la valeur v de sa vitesse en chaque position est indépendante du temps.

• **Qu'est-ce que le débit volumique ?**

En régime permanent indépendant du temps, lorsqu'un volume V de fluide s'écoule au travers d'une section pendant une durée Δt , le débit volumique D_v est donné par la relation :

$$D_v \text{ en } \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow D_v = \frac{V \text{ en } \text{m}^3}{\Delta t \text{ en } \text{s}}$$

1.a. Le système est le ballon modélisé par son centre de masse. Le poids est la seule force s'exerçant sur le système puisque l'on néglige les frottements de l'air (doc. A).

b. D'après la deuxième loi de Newton, appliquée au centre de masse du ballon :

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \text{ avec } \Sigma \vec{F} = \vec{P} = m\vec{g}.$$

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

Les coordonnées du vecteur accélération sont :

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

2.a. Par analogie avec les lignes permettant de calculer les coordonnées du vecteur vitesse (lignes 19 à 25), on peut calculer les coordonnées a_x et a_y du vecteur accélération par les lignes suivantes :

```
ax=[]
for i in range(len(vx)-1) :
    ax=ax+[(vx[i+1]-vx[i])/(t[i+1]-t[i])]
```

```
ay=[]
for i in range(len(vy)-1) :
    ay=ay+[(vy[i+1]-vy[i])/(t[i+1]-t[i])]
```

b.

On s'attend, d'après la question **1.b.**, à obtenir :

$$\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g = -9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \end{cases}$$

C'est bien le cas, l'affichage donnant $(a_x; a_y)$:

```
( +0.00E+00 m/s^2 ; -9.81E+00 m/s^2 )
( -9.76E-15 m/s^2 ; -9.81E+00 m/s^2 )
( +1.95E-14 m/s^2 ; -9.81E+00 m/s^2 )
( -2.93E-14 m/s^2 ; -9.81E+00 m/s^2 )
( +2.93E-14 m/s^2 ; -9.81E+00 m/s^2 )
( +9.76E-15 m/s^2 ; -9.81E+00 m/s^2 )
( -9.76E-15 m/s^2 ; -9.81E+00 m/s^2 )
( -5.86E-14 m/s^2 ; -9.81E+00 m/s^2 )
```

Les valeurs de a_x sont négligeables et les valeurs de a_y sont conformes à celle attendues.

3.a. Par définition, $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$. En recherchant les primitives temporelles des coordonnées du vecteur accélération, il vient :

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

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

$$\text{D'où } \begin{cases} C_x = v_0 \times \cos \alpha \\ -g \times 0 + C_y = v_0 \times \sin \alpha \end{cases} \text{ soit } \begin{cases} C_x = v_0 \times \cos \alpha \\ C_y = v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse s'écrivent :

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

Par définition, $\vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}$ avec G centre de masse du ballon.

En recherchant les primitives temporelles des coordonnées du vecteur vitesse, il vient :

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

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

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

$$\text{donc } \begin{cases} D_x = 0 \\ D_y = 0 \end{cases}$$

Les équations horaires du mouvement du ballon s'écrivent :

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

b. De l'équation horaire $x = v_0 \times \cos \alpha \times t$,

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

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

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

$$\text{D'où } y = -\frac{1}{2} \times \frac{g}{v_0^2 \times \cos^2 \alpha} \times x^2 + x \times \tan \alpha.$$

4. Sans tenir compte de la taille du ballon qui n'est pas indiquée dans l'énoncé, la pénalité peut être marquée si, lorsque $x = 35$ m, la coordonnée y est supérieure à 3,40 m.

Calculons y pour $x = 35$ m :

$$y = -\frac{1}{2} \times \frac{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{(25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \times \cos^2(40^\circ)} \times (35 \text{ m})^2 + 35 \text{ m} \times \tan(40^\circ)$$

$y = 13$ m. Le ballon passerait au-dessus de la barre horizontale. La pénalité pourrait être marquée.

5. La distance parcourue par le ballon est en réalité plus petite car il est freiné par les forces de frottements de l'air que l'on avait négligées dans la première partie de l'exercice.

15

Premier principe de la thermodynamique et bilan énergétique

Programme officiel

L'énergie : conversions et transferts

| 1. Décrire un système thermodynamique : exemple du modèle du gaz parfait | |
|---|--|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression. Équation d'état du gaz parfait. | Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait. |
| 2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique | |
| Énergie interne d'un système. Aspects microscopiques. Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail. Capacité thermique d'un système incompressible. Énergie interne d'un système incompressible. | 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, 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. Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique. <i>Procéder à l'étude énergétique d'un système thermodynamique.</i> |

Liens avec le programme officiel de première (enseignement scientifique)

| Notions | Connaissances et savoir-faire | Modèles associés |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel. Énergie potentielle. Énergie mécanique. Conservation et non conservation de l'énergie mécanique. | <ul style="list-style-type: none"> Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel. Utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur. Identifier des situations de conservation et de non conservation de l'énergie mécanique. Exploiter la conservation de l'énergie mécanique dans des cas simples | <p>Si $\sum_i W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_{NC}) = 0$, $E_m = \text{constante}$</p> |
| Énergie molaire de réaction ($J \cdot \text{mol}^{-1}$), pouvoir calorifique ($J \cdot \text{kg}^{-1}$), énergie libérée lors d'une combustion (J). | <ul style="list-style-type: none"> Estimer l'énergie molaire de réaction pour une transformation en phase gazeuse à partir de la donnée des énergies des liaisons. Mettre en œuvre une expérience pour estimer le pouvoir calorifique d'un combustible. | |

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo : Variation de l'énergie mécanique

1. L'énergie potentielle de pesanteur du chanteur est : $\mathcal{E}_p = m \times g \times z$ soit $\mathcal{E}_p = 70 \text{ kg} \times 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \times 0,20 \text{ m} = 1,4 \times 10^2 \text{ J}$.
2. Au sommet de la trajectoire, l'énergie cinétique du chanteur est nulle. On en déduit : $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_p = 1,4 \times 10^2 \text{ J}$.
3. On néglige les forces de frottement. Lors de sa redescente, le chanteur n'est soumis qu'à son poids qui est une force conservative. On en déduit $\sum_i W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_{NC}) = 0$, donc l'énergie mécanique se conserve : la variation de l'énergie mécanique du chanteur entre le sommet et le sol est nulle.

4. Au moment de l'impact au sol, l'énergie potentielle de pesanteur est nulle.

$$\text{Ainsi } \mathcal{E}_{m \text{ sol}} = \mathcal{E}_{c \text{ sol}} \Rightarrow \mathcal{E}_{m \text{ sol}} = \frac{1}{2} m \times v_{\text{sol}}^2.$$

$$\text{Or } \mathcal{E}_{m \text{ sol}} = \mathcal{E}_{m \text{ sommet}} = \mathcal{E}_m \text{ donc } \frac{1}{2} m \times v_{\text{sol}}^2 = \mathcal{E}_m$$

$$\Leftrightarrow v_{\text{sol}} = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_m}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,4 \times 10^2 \text{ J}}{70 \text{ kg}}} = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Flash test

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

Activité 1

expérimentale Premier principe de la thermodynamique

Capacités exigibles

- Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.
- Mettre en œuvre un dispositif pour réaliser un bilan énergétique et suivre l'évolution de la température d'un système.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation d'appareils électriques.

Matériel :

- Calorimètre.
- Conducteur ohmique chauffant.
- Agitateur.
- Chronomètre.
- Capteur de température.
- Ampèremètre.
- Voltmètre.
- Balance.
- Source de tension continue.
- Pissette d'eau.

Pratique expérimentale

1 Exemple de proposition de protocole expérimental :

- On tare le calorimètre, puis on y introduit directement, à l'aide d'une éprouvette graduée, 200 g d'eau.
- On plonge le conducteur ohmique chauffant dans l'eau.
- On mesure et note la température initiale θ_i .
- On branche en série l'ampèremètre et le conducteur ohmique chauffant à la source de tension continue de f.e.m. 6,0 V ; on place un voltmètre en dérivation aux bornes du conducteur ohmique.
- Simultanément, on allume le circuit électrique permettant de chauffer l'eau et l'on déclenche le chronomètre. On note les tensions U et intensités I électriques.
- On suit l'évolution de la température en agitant. Lorsque $\theta_f = \theta_i + 5 \text{ }^\circ\text{C}$, on stoppe le chronomètre et on détermine la durée de chauffage Δt .
- D'après les données $W_{\text{élec}} = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t = U \times I \times \Delta t$, on peut alors déterminer le travail électrique qui a permis l'élévation de la température de l'eau de $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. La température du système {eau et calorimètre} a augmenté car l'agitation thermique des entités a augmenté. On en déduit que de l'énergie microscopique cinétique a été reçue par le système.

- L'énergie potentielle d'interactions entre entités qui constituent le système ne varie pas, car le système ne subit pas de transformations physiques (changement d'état) ni de transformations chimiques ou nucléaires.

- 3 a. D'après le premier principe de la thermodynamique pour le conducteur ohmique : $\Delta U_1 = W_{\text{élec}} + Q_1$.

De plus, il est indiqué que toute l'énergie reçue par travail électrique $W_{\text{élec}}$ par le conducteur ohmique est restituée sous forme de transfert thermique Q_1 ; soit $W_{\text{élec}} = -Q_1$.

Le premier principe de la thermodynamique pour le conducteur ohmique devient : $\Delta U_1 = W_{\text{élec}} + Q_1 = 0$.

- b. D'après le premier principe de la thermodynamique pour le système {eau et calorimètre} : $\Delta U_2 = Q_2 + W_2$.

Or le système reçoit de l'énergie uniquement par transfert thermique Q_2 cédé par le conducteur ohmique, et n'en transfère pas à l'extérieur car le calorimètre est thermiquement isolé.

Donc $W_2 = 0$ et $Q_2 = -Q_1$; ainsi $\Delta U_2 = -Q_1$ soit $\Delta U_2 = W_{\text{élec}}$ ou $\Delta U_2 = U \times I \times \Delta t$.

Exemple de résultats expérimentaux obtenus pour une élévation de température de $4,3 \text{ }^\circ\text{C}$:

$U = 6,01 \text{ V}$, $I = 1,63 \text{ A}$, $\theta_i = 24,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_f = 29 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta t = 7 \text{ min } 14 \text{ s}$ soit 434 s ; $\Delta U_2 = 6,0 \text{ V} \times 1,61 \text{ A} \times 434 \text{ s} = 4,25 \times 10^3 \text{ J}$.

- 4 La durée de chauffage est proportionnelle à la masse d'eau à chauffer et à son élévation de température dans une bouilloire ; soit $\Delta t = k \times m \times \Delta \theta$.

Avec la bouilloire décrite de puissance $\mathcal{P}_e = 1\,200 \text{ W}$: si $m_1 = 200 \text{ g}$ et $\Delta \theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, la notice indique $\Delta t_1 = 30 \text{ s}$.

Soit $\Delta t_1 = k \times m_1 \times \Delta \theta_1$ (1).

Avec la même bouilloire si $m_2 = 400 \text{ g}$ et $\Delta \theta_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, on obtient de même $\Delta t_2 = k \times m_2 \times \Delta \theta_2$ (2).

En isolant k dans la relation (1) et en le remplaçant dans la relation (2), on obtient la durée maximale de chauffage recherchée :

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \times \frac{m_2 \times \Delta \theta_2}{m_1 \times \Delta \theta_1} ; \Delta t_2 = 30 \text{ s} \times \frac{0,400 \text{ kg} \times 30 \text{ }^\circ\text{C}}{0,200 \text{ kg} \times 20 \text{ }^\circ\text{C}} \text{ soit } \Delta t_2 = 90 \text{ s}.$$

Un pas vers le cours

- 5 La variation d'énergie interne ΔU 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 :

$$\Delta U \text{ en J} \xrightarrow{\quad} \Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q \xleftarrow{\quad} Q \text{ en J}$$

$W \text{ en J} \xrightarrow{\quad}$

Le premier principe de la thermodynamique permet d'établir un bilan d'énergie du système.

Activité 2

expérimentale



Tâche complexe

Variation d'énergie interne d'un système incompressible... p. 304

Capacités exigibles

- Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.
- Mettre en œuvre un dispositif pour réaliser un bilan énergétique et suivre l'évolution de la température d'un système.

Investigation

1 Étapes de la démarche de résolution

1^{re} étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

- La capacité à absorber de l'énergie du liquide de refroidissement est élevée mais inférieure à celle de l'eau.
- La capacité thermique massique c d'un système est l'énergie absorbée par 1 kg de ce système pour se réchauffer de 1 °C.
- La méthode des mélanges dans un calorimètre entre un corps chaud et un liquide froid permet de déterminer la capacité thermique de l'un des deux.
- La capacité thermique massique du cuivre est connue.
- À l'intérieur d'un calorimètre les transferts thermiques se compensent.
- On dispose d'un calorimètre, d'un cylindre de cuivre, d'eau, d'un liquide de refroidissement et de thermomètres.

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de justifier que l'eau a une capacité thermique massique supérieure à celle du liquide de refroidissement du scooter de la photographie.

3^e étape : Émettre des hypothèses permettant d'y répondre

L'eau a une capacité thermique massique supérieure à celle du liquide de refroidissement proposé, puisqu'il est dit que l'eau est un meilleur liquide de refroidissement que le liquide proposé.

4^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

- Liste du matériel** : calorimètre ; agitateur ; cylindre de cuivre ; capteur de température ; balance ; potence ; liquide de refroidissement ; pissette d'eau ; éprouvette graduée ; bécher ; cylindre de cuivre ; ficelle ; bain thermostaté.
- Protocole expérimental** : il doit permettre de déterminer les capacités thermiques massiques de l'eau et du liquide de refroidissement proposé, pour les comparer.

Pour cela, on utilisera la méthode des mélanges dans un calorimètre entre un corps chaud, le cylindre de cuivre, et un corps froid, successivement le liquide proposé puis l'eau.

Première série

| Étude de l'eau | |
|---|--|
| $\theta_i = 22,5 \text{ °C}$, $\theta_f = 24,6 \text{ °C}$; $m_{\text{eau}} = 200 \text{ g}$; $m_{\text{cuivre}} = 100 \text{ g}$. | |
| $c_{\text{eau}} = \frac{100 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 385 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (80 \text{ °C} - 24,6 \text{ °C}) - 160 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1} \times (24,6 \text{ °C} - 22,5 \text{ °C})}{200 \times 10^{-3} \text{ kg} \times (24,6 \text{ °C} - 22,5 \text{ °C})}$ | |
| soit $c_{\text{eau}} = 4,3 \times 10^3 \text{ J}$. | |

Exemple de proposition de protocole expérimental :

- Peser le cylindre en cuivre m_{cu} .
- Dans le bain thermostaté d'eau chaude réglé à $\theta_c = 80 \text{ °C}$, chauffer une grande quantité d'eau et y immerger l'échantillon en cuivre suspendu par la ficelle à la potence.
- Peser dans un calorimètre préalablement taré, une masse connue, m , d'eau (liquide étudié) à température ambiante.
- Lorsque la température de l'eau dans le calorimètre se stabilise, mesurer et noter la température initiale θ_i .
- Lorsque la température du bain thermostaté est stabilisée, prélever rapidement le cylindre de cuivre et le placer dans le calorimètre contenant l'eau étudiée.
- Agiter en suivant l'évolution de la température avec le thermomètre et noter la température finale la plus haute atteinte θ_f .
- Reproduire ce protocole en remplaçant l'eau par le liquide de refroidissement à étudier. Bien essuyer le calorimètre entre les deux expériences.
- Calculer c_{liquide} .

5^e étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

Pour le système {cuivre, calorimètre et liquide étudié}, d'après le premier principe de la thermodynamique : $\Delta U = Q + W$.

Le système n'échange aucune énergie par travail avec l'extérieur, ni par transfert thermique car le calorimètre est thermiquement isolé. Donc $\Delta U = Q + W = 0$.

$$\text{De plus, } \Delta U = \Delta U_{\text{cal}} + \Delta U_{\text{liquide}} + \Delta U_{\text{cuivre}};$$

$$\text{donc } \Delta U_{\text{cal}} + \Delta U_{\text{liquide}} + \Delta U_{\text{cuivre}} = 0.$$

D'après le complément :

$$\Delta U_{\text{cal}} = C \times (\theta_f - \theta_i);$$

$$\Delta U_{\text{liquide}} = m_{\text{liquide}} \times c_{\text{liquide}} \times (\theta_f - \theta_i);$$

$$\Delta U_{\text{cuivre}} = m_{\text{cuivre}} \times c_{\text{cuivre}} \times (\theta_f - \theta_c);$$

$$\text{soit } C \times (\theta_f - \theta_i) + m_{\text{liquide}} \times c_{\text{liquide}} \times (\theta_f - \theta_i) + m_{\text{cuivre}} \times c_{\text{cuivre}} \times (\theta_f - \theta_c) = 0.$$

On en déduit :

$$c_{\text{liquide}} = \frac{m_{\text{cuivre}} \times c_{\text{cuivre}} \times (\theta_c - \theta_f) - C \times (\theta_f - \theta_i)}{m_{\text{liquide}} \times (\theta_f - \theta_i)}.$$

Exemple de résultats expérimentaux :

- la capacité thermique massique du cuivre est connue $c_{\text{Cu}} = 385 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$;
- la capacité thermique du calorimètre utilisé est : $C = 160 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}$;
- la température du bain thermostaté est fixée à : $\theta_c = 80 \text{ °C}$;
- deux séries de mesures sont proposées ci-dessous.

| Étude du liquide de refroidissement | |
|--|--|
| $\theta_i = 22,5\text{ °C}$, $\theta_f = 28,7\text{ °C}$; $m_{\text{liquide}} = 200\text{ g}$; $m_{\text{cuivre}} = 100\text{ g}$. | |
| $c_{\text{liquide}} = \frac{100 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (80\text{ °C} - 25,2\text{ °C}) - 160\text{ J} \cdot \text{°C}^{-1} \times (25,2\text{ °C} - 22,5\text{ °C})}{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times (25,2\text{ °C} - 22,5\text{ °C})}$ soit $c_{\text{liquide}} = 3,1 \times 10^3\text{ J}$. | |

Deuxième série

| Étude de l'eau | |
|--|--|
| $\theta_i = 24,5\text{ °C}$, $\theta_f = 28,5\text{ °C}$; $m_{\text{eau}} = 200\text{ g}$; $m_{\text{cuivre}} = 200\text{ g}$. | |
| $c_{\text{eau}} = \frac{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (80\text{ °C} - 28,5\text{ °C}) - 160\text{ J} \cdot \text{°C}^{-1} \times (28,5\text{ °C} - 24,5\text{ °C})}{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times (28,5\text{ °C} - 24,5\text{ °C})}$ soit $c_{\text{eau}} = 4,2 \times 10^3\text{ J}$. | |
| Étude du liquide de refroidissement | |
| $\theta_i = 24,5\text{ °C}$, $\theta_f = 30\text{ °C}$; $m_{\text{liquide}} = 200\text{ g}$; $m_{\text{cuivre}} = 200\text{ g}$. | |
| $c_{\text{liquide}} = \frac{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times 385\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (80\text{ °C} - 29,7\text{ °C}) - 160\text{ J} \cdot \text{°C}^{-1} \times (29,7\text{ °C} - 24,5\text{ °C})}{200 \times 10^{-3}\text{ kg} \times (29,7\text{ °C} - 24,5\text{ °C})}$ soit $c_{\text{liquide}} = 3,2 \times 10^3\text{ J}$. | |

On note que :

- la capacité thermique de l'eau est supérieure à celle du liquide de refroidissement ;
- l'hypothèse précédente est donc correcte.

Données supplémentaires

- Le liquide de refroidissement est composé de 60 % environ d'eau et 40 % d'éthylène glycol : $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$.
- La capacité calorifique massique de l'éthylène-glycol :
 $c = 2,21 \times 10^3\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- La capacité thermique massique de l'eau est :
 $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Un pas vers le cours

- 2** La variation d'énergie interne d'un système incompressible dépend de :
- sa capacité thermique massique ;
 - la variation de température entre son état initial et final ;
 - sa masse.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

- Dans cette activité, il faut utiliser le premier principe vu à l'activité 1, qui pourra être fourni à l'élève.
- De même, les indications sur la masse de liquide à prélever et la température du bain thermostaté devront être fournies à l'élève. La capacité thermique du calorimètre sera fournie, elle dépend, entre autres, de la hauteur de liquide contenu dans le vase calorimétrique.
- On peut également choisir de confier l'étude d'un seul liquide par groupe, pour permettre de répéter la mesure ; puis, une comparaison entre groupes des capacités thermiques massiques obtenues des deux liquides.

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|---------------------------|--|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre que la capacité à refroidir d'un liquide est liée à sa capacité thermique massique. | | | | |
| Analyser-Raisonner | <ul style="list-style-type: none"> – Choisir de mesurer la capacité thermique massique de l'eau puis celle du liquide de refroidissement. – Repérer la valeur des transferts thermiques Q dans un calorimètre. – Identifier à l'aide des documents les expressions de la variation d'énergie interne, du calorimètre, du liquide, du cylindre de cuivre. – Appliquer le premier principe de la thermodynamique au système {cuivre, calorimètre et liquide étudié} pour exprimer la capacité thermique inconnue en fonction des autres données connues. – Identifier les grandeurs expérimentales à mesurer : θ_i, θ_f, m_{cuivre}, m_{liquide}, θ_c. – Comparer la capacité thermique massique de l'eau puis du liquide de refroidissement. | | | | |
| Réaliser | <ul style="list-style-type: none"> – Peser l'échantillon de cuivre, la masse de liquide en tarant la balance. – Fixer la température du bain thermostaté à θ_c choisie. – Immerger l'échantillon de cuivre de façon à pouvoir le sortir aisément. – Attendre l'équilibre thermique lors des différentes étapes. – Relever avec soin les différentes températures en utilisant le même thermomètre. – Calculer la capacité thermique massique de l'eau et du liquide de refroidissement. | | | | |
| Valider | Conclure par la validation ou non des hypothèses formulées. | | | | |

QCM

1. B ; 2. A et C ; 3. B ; 4. A ; 5. B ; 6. A, B et C ; 7. A ; 8. A ; 9. B ; 10. A ; 11. A.

Exercices

Appliquer le cours p. 312

3 Connaître le modèle du gaz parfait

« Dans le modèle du gaz parfait, les entités microscopiques qui constituent le gaz n'interagissent pas entre elles ; la pression du gaz est très faible, et sa masse volumique est très faible. »

4 Connaître les limites du modèle du gaz parfait

a) Faux. b) Faux. c) Vrai. d) Faux.

5 Déterminer un volume molaire1. D'après l'équation d'état des gaz parfaits, $P \times V = n \times R \times T$.D'où $\frac{V}{n} = \frac{R \times T}{P}$. Or $V_m = \frac{V}{n} \Rightarrow V_m = \frac{R \times T}{P}$.

2. a. Dans les conditions normales de température et de pression :

$$V_{m,a} = \frac{R \times T_a}{P_a} = \frac{8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 273 \text{ K}}{1,013 \times 10^5 \text{ Pa}}$$

$$V_{m,a} = 2,24 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \text{ soit } 22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

b. Dans les conditions standard de température et de pression :

$$V_{m,b} = \frac{R \times T_b}{P_b};$$

$$V_{m,b} = \frac{8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 298 \text{ K}}{1,00 \times 10^5 \text{ Pa}}$$

$$\text{soit } V_{m,b} = 2,48 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \text{ soit } 24,8 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

6 Utiliser le volume molaireD'après l'équation d'état des gaz parfaits, $P \times V = n \times R \times T$.

$$\text{D'où } \frac{V}{n} = \frac{R \times T}{P}.$$

Le volume molaire est $V_m = 23,0 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$;

$$\text{soit } V_m = 23,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} ;$$

la température est 15°C , soit : $T = 15^\circ\text{C} + 273 = 288 \text{ K}$.

$$\text{Or } V_m = \frac{V}{n} \Rightarrow P = \frac{R \times T}{V_m};$$

$$P = \frac{8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 288 \text{ K}}{23,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} \text{ soit } P = 1,04 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

7 Exprimer une masse volumique1. a. La masse volumique d'un corps est le rapport entre sa masse et son volume : $\rho = \frac{m}{V}$.

$$\text{Or, } m = n \times M \text{ donc } \rho = \frac{n \times M}{V}.$$

b. D'après l'équation d'état des gaz parfaits,

$$P \times V = n \times R \times T \Rightarrow n = \frac{P \times V}{R \times T}.$$

2. On déduit de la question précédente :

$$\rho = \frac{P \times V}{R \times T} \times \frac{M}{V} = \frac{P \times M}{R \times T}.$$

3. Lorsque la pression devient très grande, les interactions entre les particules de gaz ne sont plus négligeables. Le modèle des gaz parfaits n'est plus valide et l'équation d'état des gaz parfaits n'est donc plus valable ; par suite, la relation précédente non plus.

8 Calculer une masse volumique

Nous avons vu (exercice 7) que $\rho = \frac{P \times M}{R \times T}$ où M est la masse d'une mole d'air compte tenu de sa composition. Donc si 1 désigne les conditions « normales » et 2 les « conditions standard », on a :

$$\rho_1 = \frac{P_1 \times M}{R \times T_1} \text{ et } \rho_2 = \frac{P_2 \times M}{R \times T_2}$$

$$\text{d'où } \rho_2 = \rho_1 \times \frac{P_2 \times T_1}{P_1 \times T_2};$$

$$\text{soit } \rho_2 = 1,293 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \times \frac{1,000 \times 10^5 \text{ Pa} \times 273 \text{ K}}{1,013 \times 10^5 \text{ Pa} \times 298 \text{ K}}$$

$$\text{soit } \rho_2 = 1,17 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}.$$

9 Définir l'énergie interne

1. Le système d'étude est la plaquette de freins. Tout ce qui est externe à la plaquette (disque et air ambiant) constitue le milieu extérieur.

2. L'énergie interne de la plaquette est composée de l'énergie cinétique microscopique d'agitation thermique des particules la constituant et de l'énergie potentielle microscopique d'interaction qui existent entre ces particules.

10 Citer les différentes contributions à l'énergie interne

Lorsqu'un solide cristallin au repos macroscopique s'échauffe, son énergie cinétique microscopique augmente, car l'agitation thermique des atomes du réseau augmente. Son énergie potentielle microscopique d'interactions peut être considérée comme constante (ou en très faible augmentation). En effet, dans le réseau cristallin, des atomes vont se rapprocher, d'autres vont s'éloigner (vibrations des atomes autour de leurs positions d'équilibre). Ainsi, l'énergie interne, somme des énergies microscopiques, augmente.

L'affirmation est correcte.

11 Connaître l'énergie microscopique (1)

L'énergie potentielle microscopique de l'eau



est modifiée.

L'énergie cinétique microscopique de l'eau



reste constante.

12 Connaître l'énergie microscopique (2)

1. Les pattes de l'ours polaire en contact avec l'iceberg se refroidissent localement ; l'agitation thermique des entités qui les constituent diminue ; donc l'énergie cinétique microscopique des pattes de l'ours diminue.

2. Si la glace est fondante, l'énergie potentielle microscopique d'interaction de l'iceberg, liée au changement d'état, est modifiée puisque qu'il y a fusion.

13 Distinguer des variations d'énergie (1)

1. La valeur de la vitesse de la météorite atteint une vitesse limite à cause des interactions avec l'atmosphère. La valeur de la vitesse reste alors constante, donc l'énergie cinétique macroscopique, $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m \times v^2$, de la météorite reste constante.

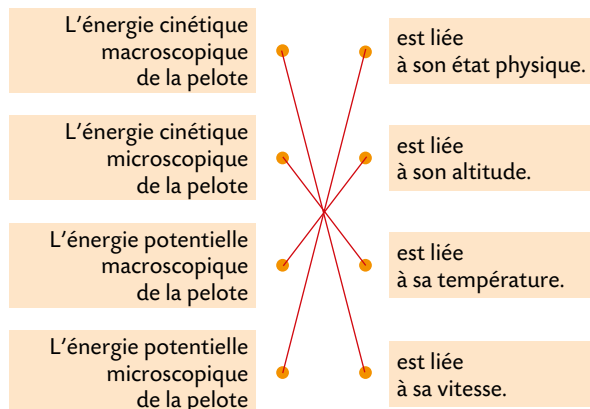
L'énergie potentielle d'interaction avec la Terre (macroscopique), $\mathcal{E}_p = -G \times \frac{m_{\text{météorite}} \times M_T}{r}$, diminue car la distance, r , entre la Terre et la météorite diminue. On en déduit que l'énergie mécanique $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p$ diminue.

2. La météorite possède de l'énergie mécanique macroscopique mais également des énergies microscopiques dont la somme est son énergie interne.

L'énergie cinétique microscopique de la météorite liée à l'agitation thermique a augmenté car celle-ci s'échauffe.

L'énergie potentielle microscopique d'interaction, liée au changement d'état, est également modifiée car la météorite fond en pénétrant dans l'atmosphère.

14 Distinguer des variations d'énergie (2)



15 Reconnaître le mode de transfert de l'énergie (1)

1. Le transfert d'énergie de la piste sur les skis s'effectue par travail, W , des forces de frottement exercées par la piste sur les skis.

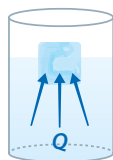
2. Le travail des forces de frottement est résistant $W < 0$; de l'énergie est perdue par le système {ski} et reçue par la piste. Donc le sens du transfert est du système vers la piste.

16 Reconnaître le mode de transfert de l'énergie (2)

1. Voir ci-contre.

2. L'eau liquide, plus chaude que le glaçon, cède de l'énergie par transfert thermique au glaçon.

3. Le système {glaçon} reçoit un transfert thermique, donc $Q > 0$.



17 Connaître le premier principe

1. $\Delta U_{i \rightarrow f}$ correspond à la variation d'énergie interne du système ; W est l'énergie échangée par travail entre le système et l'extérieur ; Q est l'énergie échangée par transfert thermique entre le système et l'extérieur.

2. Par convention, le travail et le transfert thermique sont comptés :
 - positivement s'ils sont reçus par le système ;
 - négativement s'ils sont cédés par le système.

18 Énoncer le premier principe

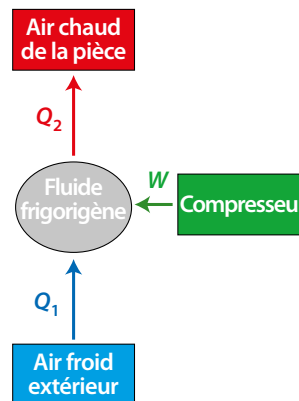
1. Le système {eau et théière} reçoit un transfert thermique Q_1 de la part de la plaque chauffante mais cède aussi un transfert thermique Q_2 à l'air ambiant (la température de surface du métal est plus élevée que celle de l'air ambiant).

2. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système {eau et théière}, la variation d'énergie interne $\Delta U = Q + W$ est égale à la somme de toutes les énergies transférées par travail W et par transfert thermique Q .

Or, il n'y a pas de transfert d'énergie par travail. Donc : $\Delta U = Q_1 + Q_2$.
 Remarque : $Q_1 > 0$ car le système reçoit effectivement de l'énergie de la part de la plaque chauffante ; $Q_2 < 0$ car le système cède effectivement de l'énergie à l'air ambiant.

19 Utiliser le premier principe (1)

1.



2. Pour le fluide frigorigène, le premier principe de la thermodynamique s'écrit : $\Delta U = W + Q_1 + Q_2$.

20 Utiliser le premier principe (2)

1. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système {shaker, jus de citron vert et jus d'orange}, entre l'état initial (introduction des ingrédients) et l'état final (fin du mélange), $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$.

Or, le shaker est un récipient qui ne permet pas d'échange d'énergie avec l'extérieur ni par transfert thermique ($Q = 0$) ni par travail ($W = 0$) ; d'où : $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$.

Remarque : des transferts thermiques, dont la somme est nulle, s'effectuent en revanche à l'intérieur du shaker entre les différents ingrédients.

2. La température du verre est celle de l'air extérieur. Le système {shaker, jus de citron vert et jus d'orange}, en équilibre thermique après mélange, est plus froid que le verre dans lequel il est placé. Le système reçoit donc de l'énergie sous forme d'un transfert thermique Q de la part du verre : le système se réchauffe.

21 Prévoir l'évolution d'une énergie interne

1. L'expression de la variation d'énergie interne du système {jus de fruit}, de l'état initial i à l'état final f , est : $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$.

2. Comme le jus d'orange refroidit de 5°C , $\theta_f - \theta_i < 0$ et donc $\Delta U_{i \rightarrow f} < 0$.

22 Calculer une variation d'énergie interne

1. L'expression de la variation d'énergie interne du système {eau}, de l'état initial i à l'état final f , est : $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i)$.

2. On déduit de l'expression précédente :

$$\theta_f = \frac{\Delta U_{i \rightarrow f}}{m \times c_{\text{eau}}} + \theta_i ;$$

$$\text{soit } \theta_f = \frac{4,21 \times 10^4 \text{ J}}{150 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}} + 20^\circ\text{C} ,$$

$$\text{soit } \theta_f = 87^\circ\text{C} .$$

Exercices

S'entraîner

p. 315

23 Connaître les critères de réussite

Pression d'un gaz

1. Le gaz est modélisé par un gaz parfait :

$$P_1 \times V_1 = n \times R \times T_1 \text{ d'où } n = \frac{P_1 \times V_1}{R \times T_1} .$$

2. a. Dans ce cas, la quantité de matière s'exprime par :

$$n = \frac{P_{\text{atm}} \times V_2}{R \times T_2}$$

b. On déduit des deux questions précédentes :

$$\frac{P_{\text{atm}} \times V_2}{R \times T_2} = \frac{P_1 \times V_1}{R \times T_1} \Rightarrow V_2 = \frac{P_1 \times V_1 \times T_2}{T_1 \times P_{\text{atm}}}$$

$$V_2 = \frac{300 \times 10^5 \text{ Pa} \times 6,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times 320 \text{ K}}{290 \text{ K} \times 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}} \text{ soit } V_2 = 2,0 \text{ m}^3.$$

3. Le débit volumique de l'air est $D_v = 90 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

Or, $D_v = \frac{V_2}{\Delta t}$, d'où la durée maximale de l'intervention :

$$\Delta t = \frac{V_2}{D_v} = \frac{2,0 \times 10^3 \text{ L}}{90 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}} \text{ soit } \Delta t = 22 \text{ min}.$$

24 Aluminium, toujours !

1. L'alliage est composé de 90 % en masse d'aluminium et 10 % en masse de magnésium, et sa capacité thermique massique est égale à la somme des capacités thermiques massiques de ses constituants coefficientées par leur pourcentage massique. La capacité thermique massique de l'alliage est donc :

$$c = \frac{90}{100} \times c_{\text{Al}} + \frac{10}{100} \times c_{\text{Mg}}$$

$$c = \frac{90}{100} \times 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} + \frac{10}{100} \times 1,02 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

soit $c = 9,09 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

2. 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 {pièce d'alliage} :

– 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 :

$$\Delta U_1 = m \times c \times (\theta_f - \theta_1).$$

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 :

$$\Delta U_2 = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_2).$$

3. 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 ayant lieu sont ceux entre le système 1 et le système 2 ; on a $Q_2 = -Q_1$ donc $\Delta U_1 = -\Delta U_2$.

Autre rédaction : le système 1 + 2 {pièce d'alliage et 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 i et l'état final f , $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$ avec $\Delta U_{i \rightarrow f} = \Delta U_1 + \Delta U_2$; soit $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$; donc $\Delta U_1 = -\Delta U_2$.

4. D'après la question précédente, $\Delta U_1 = -\Delta U_2$. Ainsi $m \times c \times (\theta_f - \theta_1) = -m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_2)$.

On développe l'expression :

$$m \times c \times \theta_f - m \times c \times \theta_1 = -m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_f + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2$$

puis en factorisant par θ_f :

$$\theta_f \times (m \times c + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}}) = m \times c \times \theta_1 + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2$$

$$\text{Ainsi : } \theta_f = \frac{m \times c \times \theta_1 + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \theta_2}{(m \times c + m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}})}$$

D'où : $\theta_f =$

$$\frac{10 \text{ kg} \times 909 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times 540 \text{ }^\circ\text{C} + 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times 19 \text{ }^\circ\text{C}}{10 \text{ kg} \times 909 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} + 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

soit $\theta_f = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

25 Rugby ball

Traduction : Dans une pièce de température $T_1 = 293 \text{ K}$, un ballon de rugby a été gonflé à une pression finale $P_1 = 168 \text{ kPa}$. Le ballon de rugby est apporté sur le terrain qui est à la température $T_2 = 278 \text{ K}$.

L'air respecte la loi des gaz parfaits.

Le volume V du ballon de rugby n'a pas changé entre la pièce et le terrain.

1. Écrire la loi des gaz parfaits dans le cas du ballon de rugby :

a. dans la pièce ;

b. sur le terrain.

2. a. Quelle sera la pression finale dans le ballon P_f quand sa température devient égale à celle de l'air extérieur sur le terrain ?

b. Dans un ballon de rugby, la pression de l'air au début du match doit être comprise entre 65,71 kPa et 68,75 kPa au-dessus de la pression atmosphérique. Faut-il alors gonfler ou dégonfler le ballon ?

Réponses :

1. a. L'équation d'état des gaz parfaits, appliquée à l'air du ballon dans la pièce, indique $P_1 \times V = n \times R \times T_1$.

b. De même sur le terrain : $P_f \times V = n \times R \times T_2$.

2. a. Il y a conservation de la quantité de matière dans le ballon qui passe de la pièce au terrain, et du volume V du ballon ; soit :

$$\frac{n}{V} = \frac{P_1}{R \times T_1} = \frac{P_f}{R \times T_2} \text{ d'où : } P_f = P_1 \times \frac{T_2}{T_1} ;$$

$$P_f = 168 \times 10^3 \text{ Pa} \times \frac{278 \text{ K}}{293 \text{ K}} \text{ soit } P_f = 159 \text{ kPa}.$$

b. Au début du match, la pression dans le ballon doit vérifier $167 \text{ kPa} \leq P_{\text{ballon}} \leq 170 \text{ kPa}$.

$P_f = 159 \text{ kPa}$ est plus faible que la valeur minimale autorisée : il est nécessaire de gonfler le ballon.

26 Il y a film et film...

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 :

$$\Delta U_1 = m_1 \times c_{\text{cire}} \times (\theta_f - \theta_a) + m_0 \times c_{\text{Al}} \times (\theta_f - \theta_a)$$

$$\text{Soit } \Delta U_1 = (m_1 \times c_{\text{cire}} + m_0 \times c_{\text{Al}}) \times (\theta_f - \theta_a).$$

$$\text{Ainsi } \Delta U_1 = (0,100 \text{ kg} \times 3,4 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} + 0,250 \text{ kg} \times 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \times (64 \text{ }^\circ\text{C} - 19 \text{ }^\circ\text{C})$$

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. En revanche, la cire ne fond pas, l'énergie potentielle microscopique d'interaction liée au changement d'état ne varie pas.

2. a. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système, entre l'état initial et l'état final, $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$.

Le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur, (le conducteur ohmique) exclusivement par transfert thermique Q_1 ; et le transfert d'énergie par travail $W = 0$. De plus, on néglige les transferts thermiques entre le système et l'air ambiant ; d'où $\Delta U_1 = Q_1$.

b. D'après les questions précédentes, $Q_1 = 2,5 \times 10^4 \text{ J}$ est positive.

c. Le conducteur ohmique restitue intégralement sous forme de transfert thermique l'énergie reçue par travail électrique, d'où $Q_1 = W_{\text{élec}}$; or $W_{\text{élec}} = \mathcal{P} \times \Delta t_1$ soit $\Delta U_1 = \mathcal{P} \times \Delta t_1$.

$$\text{On en déduit } \Delta t_1 = \frac{\Delta U_1}{\mathcal{P}}, \text{ soit } \Delta t_1 = \frac{2,5 \times 10^4 \text{ J}}{200 \text{ W}};$$

$$\Delta t_1 = 1,3 \times 10^2 \text{ s.}$$

3. De même, le transfert thermique pour qu'une fusion totale de la cire se produise est :

$$Q_2 = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t_2 \text{ d'où } Q_2 = 200 \text{ W} \times 6 \text{ min} \times 60 \text{ s} \cdot \text{min}^{-1};$$

$$\text{soit } Q_2 = 7,2 \times 10^4 \text{ J.}$$

4. Pour la fusion de la cire, au total :

$$Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 \text{ d'où } Q_{\text{tot}} = 2,5 \times 10^4 \text{ J} + 7,2 \times 10^4 \text{ J};$$

$$\text{soit } Q_{\text{tot}} = 9,7 \times 10^4 \text{ J.}$$

27 Chacun son rythme

Info ou intox ?

1. Pour le système {eau contenue dans le ballon} :

- état initial : température θ_i ;
- état final : température finale θ_f ;
- la variation d'énergie interne du système, incompressible, de l'état initial i à l'état final f , est :

$$\Delta U_1 = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i);$$

$$\text{soit } \Delta U_1 = \rho \times V \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i).$$

$$\text{D'où } \Delta U_1 = 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 80 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (65,0 \text{ °C} - 17,0 \text{ °C})$$

$$\Delta U_1 = 1,6 \times 10^7 \text{ J.}$$

2. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système, entre l'état initial et l'état final, $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$.

Or le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur, le conducteur ohmique, exclusivement par transfert thermique Q_1 ; donc le transfert d'énergie par travail est nul : $W = 0$. De plus, on néglige toute perte thermique, donc les transferts thermiques autres que ceux existant entre le système et l'extérieur sont nuls; d'où $\Delta U_1 = Q_1$.

3. Le conducteur ohmique restitue intégralement par transfert thermique Q_1 l'énergie reçue par travail électrique; d'où :

$$Q_1 = W_{\text{élec}}; \text{ or } W_{\text{élec}} = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t_1 \text{ donc } Q_1 = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t_1.$$

4. De la relation $\Delta U_1 = Q_1$ on déduit :

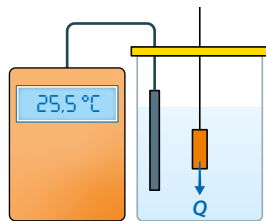
$$\Delta U_1 = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t_1 \text{ soit } \Delta t_1 = \frac{\Delta U_1}{\mathcal{P}_{\text{élec}}}$$

$$\text{d'où } \Delta t_1 = \frac{1,6 \times 10^7 \text{ J}}{1\,500 \text{ W}} \text{ soit } \Delta t_1 = 1,1 \times 10^4 \text{ s.}$$

5. Δt_1 est d'environ 3 heures : la durée de chauffe annoncée par le constructeur est correcte.

28 Musique !

1. Schéma de la situation initiale :



2. Pour le sous-système 1 {calorimètre et eau} :

- état initial : température ambiante θ_i ;
- état final : température finale θ_f ;
- la variation d'énergie interne du sous-système 1, incompressible, de l'état initial 1 à l'état final f , est :

$$\Delta U_1 = m_1 \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i) + C \times (\theta_f - \theta_i)$$

$$\text{soit } \Delta U_1 = (m_1 \times c_{\text{eau}} + C) \times (\theta_f - \theta_i)$$

$$\text{soit } \Delta U_1 = (0,300 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + 225 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1})$$

$$\times (19,9 \text{ °C} - 18,0 \text{ °C})$$

$$\Delta U_1 = 2,81 \times 10^3 \text{ J}$$

3. Pour le sous-système 2 {laiton} :

- état initial : température ambiante θ_2 ;
- état final : température finale θ_f ;
- la variation d'énergie interne du sous-système 2, incompressible, de l'état initial 2 à l'état final f , est : $\Delta U_2 = m_2 \times c_2 \times (\theta_f - \theta_2)$.

4. a. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système 1 + 2, {calorimètre, eau et laiton}, entre l'état initial et l'état final, $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$.

De plus, on néglige les transferts thermiques entre le système et l'air ambiant; donc le système n'échange pas d'énergie avec l'extérieur ni par transfert thermique donc $Q = 0$, ni par travail $W = 0$; d'où $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$ avec $\Delta U_{i \rightarrow f} = \Delta U_1 + \Delta U_2$.

$$\text{D'où } \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0.$$

b. D'après les résultats précédents, $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$ s'écrit :

$$\Delta U_1 + m_2 \times c_2 \times (\theta_f - \theta_2) = 0;$$

$$\text{d'où } c_2 = -\frac{\Delta U_1}{m_2 \times (\theta_f - \theta_2)} = -\frac{(m_1 \times c_{\text{eau}} + C) \times (\theta_f - \theta_i)}{m_2 \times (\theta_f - \theta_2)};$$

$$c_2 = -\frac{(0,300 \text{ kg} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + 225 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}) \times (19,9 \text{ °C} - 18,0 \text{ °C})}{0,100 \text{ kg} \times (19,9 \text{ °C} - 92,0 \text{ °C})}$$

$$\text{soit } c_2 = 3,9 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}.$$

5. a. Pour la fabrication d'instrument, on recherche du laiton ayant un pourcentage massique de 80 % en cuivre et 20 % en zinc. D'après le document, la valeur de $c_2 = 3,90 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ est associée à un échantillon ayant un pourcentage massique de 70 % en cuivre et 30 % en zinc; cet échantillon n'est donc pas utilisable pour réaliser un instrument de musique.

b. Il existe des incertitudes sur les mesures des masses et des températures. Particulièrement sur la température initiale du laiton θ_2 , qui peut varier en réalité, le temps d'être placé dans le calorimètre et qui influe également sur la température θ_f . L'expérience nécessiterait d'être répétée pour gagner en fiabilité et une évaluation, par la méthode de type A, de l'incertitude-type serait possible.

29 Équation de Van der Waals

1. Soit L'équation de Van der Waals :

$$\left(P + \frac{n^2 \times a}{V^2} \right) (V - n \times b) = n \times R \times T.$$

Quand le volume V devient très grand, le terme $\frac{n^2 \times a}{V^2}$ devient

négligeable devant P et $\left(P + \frac{n^2 \times a}{V^2} \right)$ tend vers P ; le terme $n \times b$

devient négligeable devant V et $(V - n \times b)$ tend vers V .

On retrouve alors la loi des gaz parfaits : $P \times V = n \times R \times T$.

2. a. D'après l'équation des gaz parfaits, $P \times V = n \times R \times T$ d'où $p = \frac{n \times R \times T}{V}$.

$$p = \frac{1,00 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 300,0 \text{ K}}{5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3} = 4,99 \times 10^5 \text{ Pa}$$

b. Dans le cadre du modèle du gaz de Van der Waals :

$$\bullet \text{ pour le néon : } P'(\text{Ne}) = \frac{n \times R \times T}{(V - n \times b)} - \frac{n^2 \times a}{V^2};$$

soit :

$$P'(\text{Ne}) = \frac{1,00 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 300,0 \text{ K}}{5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1,00 \text{ mol} \times 1,71 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} - \frac{(1,00 \text{ mol})^2 \times 0,02135 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2}}{(5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)^2};$$

$$P'(\text{Ne}) = 5,00 \times 10^5 \text{ Pa}$$

• pour le dioxyde de carbone :

$$P'(\text{CO}_2) = \frac{1,00 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 300,0 \text{ K}}{5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1,00 \text{ mol} \times 4,267 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} - \frac{(1,00 \text{ mol})^2 \times 0,364 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2}}{(5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)^2};$$

$$P'(\text{CO}_2) = 4,89 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

c. La pression du néon est plus proche de celle d'un gaz parfait que celle du dioxyde de carbone. Le néon est celui des deux gaz qui se rapproche le plus du gaz parfait. En effet, le néon est formé d'entités plus petites qui sont des atomes isolés se rapprochant des particules « ponctuelles » du gaz parfait.

Pour aller plus loin :

Aux basses pressions, dans l'équation de Van der Waals, la correction apportée sur la pression par le terme $\frac{n^2 \times a}{V^2}$ est plus importante que celle apportée sur le volume de sorte que l'équation devient :

$$\left(P + \frac{n^2 \times a}{V^2} \right) \times V \approx n \times R \times T.$$

On a alors : $P_{\text{gaz réel}} < P_{\text{gaz parfait}}$

En effet, le terme représente la part liée aux attractions réciproques qui s'exercent entre les particules qui tendent à « minorer » la pression exercée sur les parois. Ce terme prend donc en compte le caractère attractif des interactions entre molécules qui se manifestent à grande distance.

Aux hautes pressions, dans l'expression de l'équation de Van der Waals, la correction apportée sur le volume par le terme $n \times b$ est plus importante que celle apportée sur la pression, de sorte que l'équation devient : $P \times (V - n \times b) \approx n \times R \times T.$

On a alors : $P_{\text{gaz réel}} > P_{\text{gaz parfait}}$

En effet, le terme $n \times b$ représente la part liée aux répulsions réciproques qui s'exercent entre les particules qui ne peuvent s'interpénétrer lorsqu'elles sont trop rapprochées. Ce terme prend donc en compte le caractère répulsif des interactions entre molécules qui se manifestent à courte distance et leur caractère non ponctuel.

30 Résolution de problème

Pompe à chaleur

1^{re} étape : S'approprier la question posée.

1. Quelle grandeur citée peut être reliée à une durée par une relation simple ?
2. Quelle grandeur citée peut être reliée à une température par une relation simple ?
3. En quoi la durée de fonctionnement de la PAC impacte-t-elle la température de l'air de la pièce ?
4. Y-a-t-il un lien entre le coefficient de performance et le travail électrique consommé par la PAC ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

- On apprend qu'une PAC fournit un transfert thermique à l'air de la pièce et qu'elle comprend un compresseur qui nécessite un travail électrique.
- Le coefficient de performance de la PAC relie le transfert thermique Q et le travail électrique nécessaire.
- On apprend que l'air est considéré comme un gaz incompressible.
- On apprend que la puissance électrique de la PAC est 750 W dans le mode chauffage étudié.

3^e étape : Dégager la problématique

Quelle est la durée de fonctionnement de la PAC nécessaire pour que la température dans la pièce atteigne $\theta_f = 19^\circ\text{C}$?

4^e étape : Construire la réponse

- Utiliser la relation entre la puissance et le travail électrique pour exprimer la durée de fonctionnement de la PAC.
- Utiliser la définition du COP pour exprimer le travail électrique par une nouvelle relation.

- Utiliser la relation entre la variation de l'énergie interne d'un fluide incompressible et sa variation de température, entre un état initial et un état final.

- Écrire le premier principe de la thermodynamique pour l'air de la pièce d'habitation afin de relier le transfert thermique Q reçu par l'air de la pièce et sa variation d'énergie interne ΔU .

- Combiner les différentes relations obtenues pour isoler la durée recherchée en fonction de grandeurs dont les valeurs sont données : COP, températures, capacité thermique massique de l'air, volume d'air, masse volumique de l'air.

5^e étape : Répondre

- Présenter le contexte et introduire la problématique.

Un particulier veut connaître la durée au bout de laquelle la pompe à chaleur, qu'il souhaite acheter, aura transféré à l'air de la pièce l'énergie nécessaire pour que la température de l'air atteigne la température de confort fixée à 19°C . Il faut donc trouver une relation qui relie l'intervalle de temps, inconnu, et la variation de température de l'air, connue.

- Mettre en forme la réponse.

Le travail électrique consommé pendant la durée Δt par le compresseur de la PAC est lié à la puissance électrique : $W_{\text{élec}} = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t$. D'après la définition du COP, l'énergie absorbée par le système {air de la pièce}, par transfert thermique est $Q = \text{COP} \times W_{\text{élec}}$.

On en déduit $Q = \text{COP} \times \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t$ et donc $\Delta t = \frac{Q}{\text{COP} \times \mathcal{P}_{\text{élec}}}$.

Recherchons donc Q : d'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système {air de la pièce}, entre l'état initial et l'état final, $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q + W$. Or, le système reçoit de l'énergie de la PAC (milieu extérieur), exclusivement par transfert thermique Q . Donc le transfert d'énergie par travail est nul : $W = 0$. D'où $\Delta U = Q$.

Soit le système {air de la pièce} :

- état initial : température ambiante θ_i ;
- état final : température finale θ_f ;
- la variation d'énergie interne du système, incompressible, de l'état initial 1 à l'état final f, est :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = m_{\text{air}} \times c_{\text{air}} \times (\theta_f - \theta_i) \text{ avec } m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \times V_{\text{air}}$$

d'où $\Delta U_{i \rightarrow f} = \rho_{\text{air}} \times V \times c_{\text{air}} \times (\theta_f - \theta_i)$.

Puisque $Q = \Delta U_{i \rightarrow f}$, on en déduit :

$$Q = \rho_{\text{air}} \times V \times c_{\text{air}} \times (\theta_f - \theta_i).$$

La relation $\Delta t = \frac{Q}{\text{COP} \times \mathcal{P}_{\text{élec}}}$ devient alors :

$$\Delta t = \frac{\rho_{\text{air}} \times V \times c_{\text{air}} \times (\theta_f - \theta_i)}{\text{COP} \times \mathcal{P}_{\text{élec}}}.$$

On calcule :

$$\Delta t = \frac{1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 100 \text{ m}^3 \times 1,004 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times (19,0^\circ\text{C} - 15,0^\circ\text{C})}{4 \times 750 \text{ W}}$$

soit $\Delta t = 1,6 \times 10^2 \text{ s}$.

- Conclure et introduire, quand c'est possible, une part d'esprit critique.

La durée de fonctionnement de la PAC pour chauffer la pièce à la température souhaitée de confort est de $1,6 \times 10^2 \text{ s}$, soit moins de 3 minutes. Cette durée semble courte. Elle est en fait sous-estimée car le transfert thermique nécessaire est forcément supérieur du fait des murs, plancher et plafond de la pièce qu'il faudrait également prendre en compte ; l'air considéré comme incompressible entraîne également une approximation.

Préparation à l'écrit

31 Le principe d'une montgolfière

1. La masse molaire de l'air est : $M = \frac{80}{100} \times M_{N_2} + \frac{20}{100} \times M_{O_2}$
 soit $M = \frac{80}{100} \times (14,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 2) + \frac{20}{100} \times (16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 2)$

donc $M = 28,8 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

2. a. Un gaz peut être considéré comme parfait si sa pression est très faible.

b. D'après l'équation d'état des gaz parfaits,

$$P \times V = n \times R \times T ;$$

$$\text{d'où la quantité de matière dans le ballon : } n = \frac{P \times V}{R \times T} .$$

$$\text{Ainsi } n = \frac{1,013 \times 10^5 \text{ Pa} \times 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 293 \text{ K}} = 4,2 \times 10^{-1} \text{ mol} .$$

c. La masse d'air est : $m_{\text{air}} = n \times M$,

$$\text{soit } m_{\text{air}} = 4,2 \times 10^{-1} \text{ mol} \times 28,8 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 12 \text{ g} .$$

3. a. La pression de l'air chauffé dans le ballon reste identique car le ballon est ouvert.

b. De même qu'en 2. b., la quantité de matière restant dans le

$$\text{ballon est : } n_2 = \frac{P \times V}{R \times T_2} .$$

$$\text{Ainsi } n_2 = \frac{1,013 \times 10^5 \text{ Pa} \times 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 363 \text{ K}} = 3,4 \times 10^{-1} \text{ mol} .$$

La quantité de matière perdue est :

$$n_{\text{perdue}} = n - n_2 = 8,0 \times 10^{-2} \text{ mol} .$$

La masse d'air perdue correspondante est :

$$m_{\text{perdue}} = n_{\text{perdue}} \times M ; m_{\text{perdue}} = 8,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \times 28,8 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\text{soit } m_{\text{perdue}} = 2,3 \text{ g} .$$

4. a. La deuxième loi de Newton appliquée au système {ballon et air intérieur}, de masse m , conduit à : $\vec{P} + \vec{F}_p = m \times \vec{a}$.

b. Par projection de la relation précédente sur un axe vertical (z/z') orienté vers le haut, on obtient : $-P + F_p = m \times a_z$.

Pour que le ballon décolle, il faut que $a_z > 0$ soit $F_p > P$.

c. D'après la question précédente pour que le décollage ait lieu, il est nécessaire que : $F_p > P$.

D'après la définition, la poussée d'Archimède est :

$$F_p = \rho_{\text{air extérieur}} \times V \times g .$$

De plus, le poids du système {ballon et air intérieur} est :

$$P = m_{\text{air et ballon}} \times g .$$

$$\text{Soit } P = \rho_{\text{air intérieur}} \times V \times g + m_b \times g = (\rho_{\text{air intérieur}} \times V + m_b) \times g .$$

$F_p > P$ devient donc :

$$\rho_{\text{air extérieur}} \times V > \rho_{\text{air intérieur}} \times V + m_b .$$

Pour que le ballon s'élève, il faut donc :

$$\rho_{\text{air extérieur}} - \frac{m_b}{V} > \rho_{\text{air intérieur}} .$$

Il faut donc chauffer l'air intérieur du ballon pour que sa masse

volumique diminue de façon à être inférieure à $\rho_{\text{air extérieur}} - \frac{m_b}{V}$.

Cela fonctionnera d'autant mieux que l'air extérieur est dense, donc froid, et que l'air intérieur est peu dense donc chaud.

Autre rédaction possible :

D'après la définition, la poussée d'Archimède est :

$$F_p = m_{\text{air extérieur}} \times g .$$

De plus, le poids du système {ballon et air intérieur} est :

$$P = m_{\text{air intérieur}} \times g + m_b \times g .$$

$F_p > P$ devient donc $m_{\text{air extérieur}} \times g > m_{\text{air intérieur}} \times g + m_b \times g$.

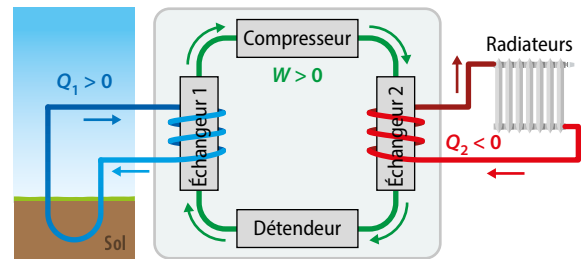
Pour que le ballon s'élève, il faut donc :

$$m_{\text{air extérieur}} > m_{\text{air intérieur}} + m_b .$$

Il faut diminuer la masse d'air intérieur en chauffant la base du ballon pour en expulser une partie.

32 Géothermie

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} :

– état initial : température ambiante θ_i ;

– état final : 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 :

$$\Delta U_2 = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i) \text{ avec } m_{\text{eau}} = D_m \times \Delta t \text{ où } D_m \text{ est le débit massique ;}$$

$$\text{soit } \Delta U_2 = D_m \times \Delta t \times c_{\text{eau}} \times (\theta_f - \theta_i) .$$

$$\text{D'où } \Delta U_2 = 145 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 4 \text{ h} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (20 \text{ °C} - 12 \text{ °C})$$

$$\text{soit } \Delta U_2 = 2 \times 10^7 \text{ J} .$$

b. D'après le premier principe appliqué à l'eau des radiateurs, $\Delta U_2 = Q_{\text{reçue par l'eau}} > 0$ car $W = 0$ et le seul transfert d'énergie reçu par l'eau des radiateurs est un transfert thermique de la part du fluide spécifique ; le fluide spécifique cède donc à l'eau des radiateurs : $Q_2 = -Q_{\text{reçue par l'eau}}$ soit $Q_2 = -\Delta U_2$; donc $Q_2 = -2 \times 10^7 \text{ J}$.

On considère que le fluide est un système fermé (il entre la même quantité de fluide qu'il n'en sort au niveau de l'échangeur 2).

3. a. D'après le premier principe de la thermodynamique pour le système {fluide spécifique} entre l'état initial et l'état final, $\Delta U_{\text{fluide}} = Q + W$.

Or, le système {fluide spécifique} au repos macroscopique reçoit un travail électrique $W_{\text{élec}} > 0$, reçoit un transfert thermique $Q_1 > 0$, et cède un transfert thermique $Q_2 < 0$.

$$\text{D'où } \Delta U_{\text{fluide}} = W_{\text{élec}} + Q_1 + Q_2 .$$

b. Puisque l'état initial est identique à l'état final au cours d'un cycle : $\Delta U_{\text{fluide}} = 0 \text{ J}$, donc $W_{\text{élec}} + Q_1 + Q_2 = 0$ soit $Q_1 = -Q_2 - W_{\text{élec}}$.

$$\text{Ainsi } Q_1 = 145 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 4 \text{ h} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (20 \text{ °C} - 12 \text{ °C}) - 4,82 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\text{soit environ } Q_1 = 1 \times 10^7 \text{ J} .$$

4. L'énergie utile donnée à l'eau est $-Q_2$ et l'énergie facturée est le travail électrique indispensable au fonctionnement du compresseur, donc le rapport est $\frac{-Q_2}{W_{\text{élec}}}$ avec :

$$\frac{-Q_2}{W_{\text{élec}}} = \frac{145 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 4 \text{ h} \times 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (20 \text{ °C} - 12 \text{ °C})}{4,82 \times 10^6 \text{ J}}$$

$$\text{soit } \frac{-Q_2}{W_{\text{élec}}} = 4 .$$

La PAC restitue quatre fois plus d'énergie par transfert thermique qu'elle ne consomme de travail électrique.

Préparation à l'ECE

1. a. La glace est en excès et reste en fusion, donc à la température de fusion de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, constante. Le métal est en équilibre thermique avec la glace, donc à la température de fusion de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, car il n'y a plus aucun transfert d'énergie entre les deux systèmes.

b. Pour le système {échantillon métallique} :

– état initial : température ambiante θ_i ;

– état final : température finale θ_f ;

– 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. D'après le premier principe de la thermodynamique, pour le système {échantillon métallique}, entre l'état initial et l'état final, $\Delta U_1 = Q$, car $W = 0$ et le seul transfert d'énergie échangé par le système est le transfert thermique Q cédé à la glace plus froide (milieu extérieur). On néglige tout autre transfert thermique donc celui avec l'air ambiant.

b. Il faut essuyer le morceau de glace fondante afin d'enlever la couche superficielle d'eau pour que le métal soit en contact uniquement avec la glace ; on pèsera ensuite la bonne quantité d'eau formée par fusion de la glace due au transfert thermique issu du métal. Et cela, rapidement, pour limiter les échanges avec l'air qui provoque aussi la fusion de la glace.

c. D'après la formule fournie : $c = -\frac{m_2 \times L_{\text{fus}}}{m_1 \times (\theta_f - \theta_i)}$.

$$\text{On a } c = -\frac{9,8 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 334 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}}{105 \times 10^{-3} \text{ kg} \times (-81,0\text{ }^{\circ}\text{C})} ;$$

$$\text{soit } c = 3,849 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

Ce résultat ne sera arrondi qu'après évaluation de l'incertitude-type.

3. a. On utilise la formule de l'incertitude-type :

$$u(c) = c \times \sqrt{\left(\frac{u(m_1)}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{u(m_2)}{m_2}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta\theta)}{\Delta\theta}\right)^2}.$$

$$\text{Ainsi : } u(c) = -\frac{9,8 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 334 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}}{105 \times 10^{-3} \text{ kg} \times (-81,0\text{ }^{\circ}\text{C})} :$$

$$\times \sqrt{\left(\frac{1 \text{ g}}{105 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0,1 \text{ g}}{9,8 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0,1\text{ }^{\circ}\text{C}}{81\text{ }^{\circ}\text{C}}\right)^2}.$$

$$u(c) = 6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

Remarque : on arrondit à la valeur supérieure pour ne pas minorer l'incertitude-type (5,4 arrondi à 6).

$$\text{On a alors : } c = (3,85 \pm 0,06) \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

b. Il s'agit du cuivre de capacité $c = 385 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ compris dans l'intervalle déterminé précédemment :

$$[379 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} ; 391 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}].$$

Vers l'oral

Je m'exprime à l'oral sur

Le premier principe de la thermodynamique

• De quoi l'énergie interne d'un système macroscopique dépend-elle ?

L'énergie interne dépend de l'énergie cinétique microscopique, ainsi que de l'énergie potentielle microscopique des entités constituant le système.

• Que signifie un système au repos macroscopique ?

Un système est au repos macroscopique si la variation de son énergie macroscopique est nulle, donc si la variation de son énergie mécanique est nulle.

• Citer deux modes de transfert de l'énergie.

Il y a le travail W et le transfert thermique Q .

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 extérieure 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.

p. 320

16

Transferts thermiques

Programme officiel

L'énergie : conversions et transferts

2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique

| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
|--|---|
| Modes de transfert thermique. Flux thermique. Résistance thermique. | Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : convection, conduction, rayonnement. Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée. |
| Bilan thermique du système Terre-atmosphère. Effet de serre. | Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée. Discuter qualitativement l'effet de serre sur la température terrestre moyenne. |
| Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat. | Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps. <i>Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.</i> Capacité mathématique : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant. |

Liens avec le programme officiel de première (enseignement scientifique)

| Notions | Connaissances et savoir-faire | Modèles associés |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> La proportion de la puissance totale, émise par le Soleil et atteignant la Terre, est déterminée par son rayon et sa distance au Soleil. Une fraction de cette puissance, quantifiée par l'albédo terrestre moyen, est diffusée par la Terre vers l'espace, le reste est absorbé par l'atmosphère, les continents et les océans. | <ul style="list-style-type: none"> En s'appuyant sur un schéma, calculer la proportion de la puissance émise par le Soleil qui atteint la Terre. L'albédo terrestre étant donné, déterminer la puissance totale reçue par le sol de la part du Soleil. | <ul style="list-style-type: none"> L'albédo α est une grandeur sans unité qui caractérise l'aptitude d'une surface à renvoyer, par diffusion et/ou réflexion, le rayonnement qui lui parvient : <div style="text-align: center;"> <p>$\alpha = \frac{P_r}{P_i}$</p> </div> |
| <ul style="list-style-type: none"> Le sol émet un rayonnement électromagnétique dans le domaine infra-rouge (longueur d'onde voisine de $10 \mu\text{m}$) dont la puissance par unité de surface augmente avec la température. Une partie de cette puissance est absorbée par l'atmosphère, qui elle-même émet un rayonnement infrarouge vers le sol et vers l'espace (effet de serre). | <ul style="list-style-type: none"> Commenter la courbe d'absorption de l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde. Représenter sur un schéma les différents rayonnements reçus et émis par le sol. | <ul style="list-style-type: none"> La puissance par unité de surface ou puissance surfacique p émise par un corps noir est liée à sa température par la relation : <div style="text-align: center;"> <p>$p = \sigma \times T^4$</p> </div> avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, la constante de Stefan-Boltzmann, et p comptée ici positivement. |
| <ul style="list-style-type: none"> La puissance reçue par le sol en un lieu donné est égale à la somme de la puissance reçue du Soleil et de celle reçue de l'atmosphère. Ces deux dernières sont du même ordre de grandeur. Un équilibre, qualifié de dynamique, est atteint lorsque le sol reçoit au total une puissance moyenne égale à celle qu'il émet. La température moyenne du sol est alors constante. | <ul style="list-style-type: none"> Expliquer qualitativement l'influence des différents facteurs (albedo, effet de serre) sur la température terrestre moyenne. | <ul style="list-style-type: none"> $\mathcal{P}_{\text{reçue par le sol}} = \mathcal{P}_{\text{reçue du soleil}} + \mathcal{P}_{\text{reçue de l'atmosphère}}$. À l'équilibre dynamique : $\mathcal{P}_{\text{reçue par le sol}} = \mathcal{P}_{\text{émise par le sol}}$ |

Commentaire sur la notation utilisée dans le chapitre

Les puissances sont notées en majuscules (\mathcal{P}). Les puissances surfaciques sont notées en minuscules (p). Les grandeurs $\theta(t)$ et $T(t)$ dépendant du temps sont notées par commodité d'écriture θ et T .

Activité 1

expérimentale



Tâche complexe

Résistance thermique de conduction d'un matériau p. 322

Capacité exigible

- Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.

Investigation

1 Étapes de la démarche de résolution :

1^{re} étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

1. Pour identifier les paramètres ayant une influence sur l'efficacité d'un bouclier thermique, il est nécessaire de déterminer la résistance thermique du matériau.

2. La résistance thermique R_{th} caractérise l'opposition d'un milieu au transfert thermique entre deux points.

3. La résistance thermique R_{th} entre deux points A et B est égale au rapport de l'écart de température entre ces deux points ($\theta_A - \theta_B$) et du flux thermique Φ .

4. Le flux thermique Φ est égal au rapport du transfert thermique Q et de sa durée Δt .

5. On dispose d'un appareil de mesure de la résistance thermique et de plusieurs échantillons de matériaux.

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

De quels paramètres la résistance thermique et donc l'efficacité d'un matériau d'isolation dépend-elle ?

3^e étape : Émettre des hypothèses permettant d'y répondre

La résistance thermique d'un matériau varierait avec sa nature et augmenterait avec son épaisseur (un de ses paramètres géométriques).

4^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

Liste du matériel : appareil de mesure du flux thermique et de la résistance thermique, plusieurs échantillons de matériaux.

Protocole :

- Choisir différents matériaux de surface identique S adaptée à l'appareil.

• À l'aide d'un pied à coulisse, déterminer l'épaisseur de chacun si elle n'est pas indiquée.

• Mesurer la résistance thermique de chaque échantillon.

Remarque : Certains appareils déterminent seulement le flux thermique traversant l'échantillon.

Dans ce cas, relever la valeur du flux affiché et noter l'écart de température $\theta_A - \theta_B$; il est ici imposé par l'appareil : 10 °C.

$$\text{Calculer } R_{th} = \frac{(\theta_A - \theta_B)}{\Phi}.$$

5^e étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

Exemple de résultats avec l'appareil résistance thermique :

| Matériau | Épaisseur (mm) | R_{th} ($K \cdot W^{-1}$) |
|------------------|----------------|-------------------------------|
| Polystyrène choc | 5,0 | 16,2 |
| Contreplaqué | 5,0 | 20,0 |
| Verre | 5,2 | 3,7 |
| Polystyrène | 3,6 | 84,0 |
| | 7,7 | 166,1 |
| Laine | 1,8 | 18,0 |
| | 4,7 | 39,1 |

On observe que la résistance thermique du matériau dépend de sa nature et augmente avec son épaisseur.

Les deux hypothèses précédentes sont donc correctes.

Remarque : À la différence de la résistance thermique, la conductivité thermique ne dépend que du matériau aux incertitudes près.

| Matériau | Épaisseur (mm) | λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) |
|------------------|----------------|---|
| Polystyrène choc | 5,0 | 0,11 |
| Contreplaqué | 5,0 | 0,087 |
| Verre | 5,2 | 0,51 |
| Polystyrène | 3,6 | 0,015 |
| | 7,7 | 0,017 |
| Laine | 1,8 | 0,036 |
| | 4,7 | 0,044 |

On en déduit que l'efficacité du bouclier thermique dépend entre autres de la nature et de l'épaisseur du matériau qui le constitue.

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------|---|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre que l'efficacité du bouclier est liée à la résistance thermique du matériau. | | | | |
| Analyser | <ul style="list-style-type: none"> Choisir différents échantillons de différents matériaux. Choisir de mesurer la résistance thermique de chacun d'eux. Comparer la résistance thermique des échantillons de matériaux dont un seul paramètre varie. Établir l'évolution de la résistance thermique de conduction en fonction d'un premier paramètre. Établir l'évolution de la résistance thermique de conduction en fonction d'un autre paramètre. | | | | |
| Réaliser | <ul style="list-style-type: none"> Déterminer l'épaisseur de chacun des échantillons si elle n'est pas indiquée. Mesurer la résistance thermique des échantillons de matériaux. | | | | |
| Valider | Conclure par la validation ou non des hypothèses formulées. | | | | |

2 Il serait quasiment possible de poser la main sans se brûler sur la face du bouclier thermique opposée à la face chauffée à 1 200 °C, car la brique a une grande résistance thermique qui limite le transfert thermique vers la main.

Un pas vers le cours

3 Connaissant le flux thermique Φ orienté du point A vers le point B et la différence de température $\theta_A - \theta_B$ entre ces points, la résistance thermique R_{th} du (ou des) milieu(x) traversé(s) est : $R_{th} = \frac{(\theta_A - \theta_B)}{\Phi}$ avec R_{th} en °C·W⁻¹ ou en K·W⁻¹; Φ en W et $\theta_A - \theta_B$ en °C ou en K.

Activité 2

expérimentale Température d'un système incompressible au cours du temps p. 323

Capacités exigibles

- Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.
- Mettre en œuvre un dispositif pour suivre l'évolution de la température d'un système.

Pratique expérimentale

1 Exemple de protocole permettant de mesurer la température du système {eau et bécher} à intervalle de temps régulier :

- Faire chauffer de l'eau dans la bouilloire.
- Remplir d'eau chaude un bécher de 250 mL.
- Placer une sonde de température reliée à une centrale d'acquisition pour laquelle on sélectionne un « pas » d'échantillonnage, dans le bécher.
- Attendre que la température initiale θ_i s'uniformise, la noter et lancer l'acquisition des mesures.

2 Représentation graphique de l'évolution de la température en fonction du temps (voir ci-dessous).

3 a. L'équation de la courbe tracée à la question 2 peut être modélisée par une fonction :

$\theta = Ae^{axt} + B$, avec $A = (\theta_i - \theta_e)$ et $B = \theta_e$; θ_i étant la température initiale du système.

Soit $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{axt} + \theta_e$.

b. On en déduit $\frac{d\theta}{dt} = a \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{axt}$.

Si θ vérifie l'équation différentielle : $\frac{d\theta}{dt} = a \times \theta - a \times \theta_e$,

alors on obtient en explicitant chaque membre de l'équation différentielle :

$$a \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{axt} = a \times (\theta - \theta_e) \\ = a \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{axt}.$$

On vérifie que $\theta = (\theta_i - \theta_e)e^{axt} + \theta_e$ est bien une solution de l'équation différentielle.

4 Pour le système incompressible {café et tasse},

$$\theta - \theta_e = (\theta_i - \theta_e)e^{axt}, \text{ donc } e^{axt} = \frac{\theta - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

$$\text{soit encore } t = \frac{1}{a} \times \ln\left(\frac{\theta - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right).$$

$$t = \frac{1}{-0,20 \text{ min}^{-1}} \times \ln\left(\frac{65 \text{ °C} - 25 \text{ °C}}{85 \text{ °C} - 25 \text{ °C}}\right) = 2,0 \text{ min}.$$

La durée au bout de laquelle le café peut être dégusté est d'environ 2 minutes.

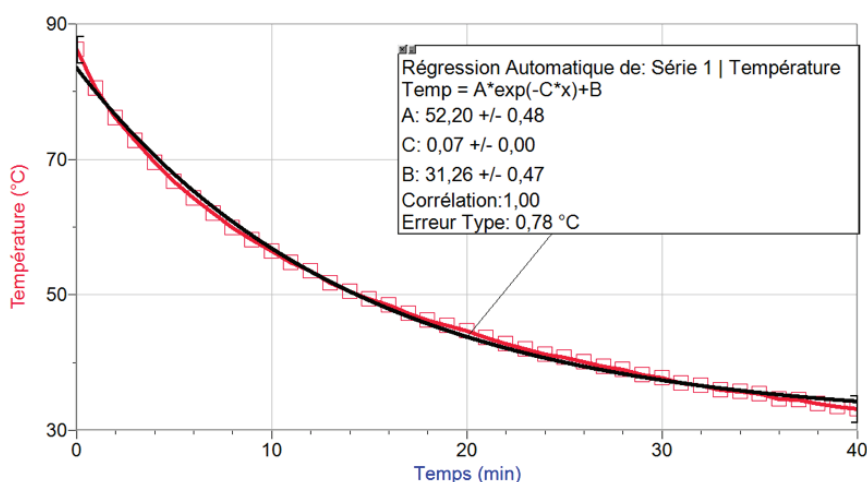
Dans la réalité, la durée est plus courte à cause des transferts thermiques par rayonnement.

Remarque : Si le bécher est remplacé par une tasse en faïence épaisse, assez bon isolant thermique, il ne reste quasiment plus que le transfert thermique ayant lieu au-dessus du liquide.

Un pas vers le cours

5 La fonction mathématique qui modélise l'évolution de la température d'un système incompressible en fonction du temps est une fonction exponentielle.

| Série 1 | |
|-------------|-----------|
| Temps (min) | Temp (°C) |
| 0 | 86,2 |
| 1 | 80,5 |
| 2 | 76,1 |
| 3 | 72,8 |
| 4 | 69,5 |
| 5 | 66,7 |
| 6 | 64,3 |
| 7 | 62,0 |
| 8 | 59,9 |
| 9 | 58,1 |
| 10 | 56,4 |
| 11 | 54,8 |
| 12 | 53,5 |
| 13 | 51,8 |
| 14 | 50,5 |
| 15 | 49,4 |
| 16 | 48,5 |
| 17 | 47,2 |
| 18 | 46,2 |
| 19 | 45,4 |
| 20 | 44,6 |
| 21 | 43,7 |
| 22 | 42,8 |
| 23 | 42,0 |
| 24 | 41,2 |
| 25 | 40,8 |



Capacités exigibles

- Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée.
- Discuter qualitativement l'effet de serre sur la température terrestre moyenne.

Analyse des documents

1 a. Le Soleil est considéré comme un corps noir à la température T_s , donc sa puissance surfacique p_s obéit à la loi de Stefan-Boltzmann : $p_s = \sigma \times T_s^4$, d'où $p_s = 5,67 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \times (5\,778 \text{ K})^4$; $p_s = 6,32 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

b. La surface du Soleil, de rayon R_s , est : $S_s = 4\pi \times R_s^2$. De plus, la puissance solaire émise par la surface du Soleil est : $\mathcal{P}_s = S_s \times p_s$ soit $\mathcal{P}_s = 4\pi \times R_s^2 \times p_s$.

Cette puissance solaire émise \mathcal{P}_s par la surface du Soleil est répartie sur une sphère de rayon D , D étant la distance Soleil-Terre. Cette sphère a une surface $S = 4\pi \times D^2$ avec $D = 1,50 \times 10^{11} \text{ m}$ (schéma A). La puissance solaire surfacique p'_s à la distance D entre la Terre et le Soleil est donc : $p'_s = \frac{\mathcal{P}_s}{S}$ ainsi $p'_s = \frac{4\pi \times R_s^2 \times p_s}{4\pi \times D^2} = \frac{R_s^2 \times p_s}{D^2}$;

$$\text{donc } p'_s = \frac{(6,96 \times 10^8 \text{ m})^2 \times 6,32 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{(1,50 \times 10^{11} \text{ m})^2} ;$$

$$p'_s = 1,36 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

c. Une portion seulement de la puissance solaire incidente est interceptée par la Terre, de rayon R_T , sur un disque de surface $s = \pi \times R_T^2$.

On en déduit la puissance solaire incidente reçue en moyenne par le système {Terre et atmosphère} :

$$\mathcal{P}_s = p'_s \times s \text{ soit } \mathcal{P}_s = p'_s \times \pi \times R_T^2.$$

d. Comme la Terre tourne sur elle-même, cette puissance se répartit sur l'ensemble de la surface S_T de la Terre avec $S_T = 4\pi \times R_T^2$. Ainsi, la puissance solaire incidente reçue en moyenne par le système {Terre et atmosphère}, appelée puissance surfacique

terrestre, est $p_T = \frac{\mathcal{P}_T}{S_T}$ donc $p_T = \frac{p'_s \times \pi \times R_T^2}{4\pi \times R_T^2}$ soit $p_T = \frac{p'_s}{4}$; donc

$$p_T = \frac{1,36 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{4} = 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (en gardant les valeurs en mémoire sur la calculatrice).}$$

2 a. D'après les DONNÉES, l'albédo du système {Terre et atmosphère} est $\alpha = 0,30$.

D'après le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE, l'albédo : $\alpha = \frac{|p_r|}{p_i} = 0,30$ où p_i

est la puissance surfacique incidente reçue par le système {Terre et atmosphère} soit $p_i = p_T$.

Donc la puissance surfacique renvoyée par le système {Terre et atmosphère} $|p_r| = \alpha \times p_T$.

On en déduit la puissance solaire surfacique moyenne absorbée par le système {Terre et atmosphère}, $p_{T(\text{abs})} = p_T - |p_r|$ soit

$$p_{T(\text{abs})} = p_T - \alpha \times p_T ; \text{ donc } p_{T(\text{abs})} = (1 - \alpha) \times p_T ; \text{ on en déduit : } p_{T(\text{abs})} = (1 - 0,30) \times 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} ; p_{T(\text{abs})} = 238 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

b. Le système {Terre et atmosphère} est considéré comme un corps noir de température de surface T_T car il réémet tout le rayonnement qu'il absorbe : $|p_{\text{émise par la Terre}}| = p_{T(\text{abs})}$.

On peut utiliser la loi de Stefan-Boltzmann rappelée dans le COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE :

$$T_T = \left(\frac{|p_{\text{émise par la Terre}}|}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} ; \text{ d'où } T_T = \left(\frac{p_{T(\text{abs})}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}.$$

$$T_T = \left(\frac{238 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} \right)^{\frac{1}{4}} = 255 \text{ K} \text{ soit } -18 \text{ }^\circ\text{C}.$$

c. Sans albédo pour le système {Terre et atmosphère} : $p_{T(\text{abs})} = p_T$ soit $p_{T(\text{abs})} = 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$T_T = \left(\frac{340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} \right)^{\frac{1}{4}} = 278 \text{ K}, \text{ soit effectivement } 5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

L'albédo est donc responsable de la diminution de la température du système.

Remarque : on peut également écrire :

$$T_T = \left(\frac{R_s^2 \times \sigma \times T_s^4}{D^2 \times 4 \times \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = T_s \times \left(\frac{R_s}{2D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{soit } T_T = 5\,778 \text{ K} \times \left(\frac{6,96 \times 10^8 \text{ m}}{2 \times 1,50 \times 10^{11} \text{ m}} \right)^{\frac{1}{2}} = 278 \text{ K}.$$

d. La température terrestre moyenne au niveau du sol est voisine de $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Or d'après la question précédente, l'albédo n'est pas responsable d'un réchauffement. D'après le schéma C, les gaz de l'atmosphère (principalement l'eau et le dioxyde de carbone) absorbent et renvoient vers la Terre une partie du rayonnement infrarouge qu'elle émet, entraînant le réchauffement de la surface de la Terre et des couches basses de l'atmosphère. C'est donc l'effet de serre qui est responsable de l'augmentation de la puissance reçue par le sol terrestre et donc de l'augmentation de sa température.

3 Sur la photographie D, les observations indiquent que la température des habitations est diminuée par le dépôt à leur surface d'une couche de chaux blanche. Cela s'explique par l'augmentation forte de l'albédo des murs blancs qui entraîne une diminution de la température moyenne du mur (façon de faire du froid avec de la chaux).

Un pas vers le cours

4 La température moyenne de la surface terrestre dépend de la puissance solaire reçue par unité de surface mais aussi de l'albédo du système {Terre et atmosphère} ainsi que de l'effet de serre dû à certains gaz présents dans l'atmosphère.

Capsule vidéo de cours : Loi de Newton

QCM

1. A ; 2. A et C ; 3. A ; 4. B ; 5. A, B et C ; 6. A ; 7. A ; 8. A ; 9. C ; 10. B.

2 Identifier le mode de transfert thermique (1)

1. et 2. On construit un tableau :

| Transfert thermique entre... | Mode de transfert thermique principal | Signe du transfert thermique pour le système {eau} |
|------------------------------|---------------------------------------|--|
| L'eau et le Soleil | Rayonnement | Positif |
| L'eau et le sable | Conduction | Positif |
| L'eau et l'air | Convection | Positif |

3 Identifier le mode de transfert thermique (2)

Le mode de transfert thermique principal est le rayonnement.

4 Déterminer un flux thermique

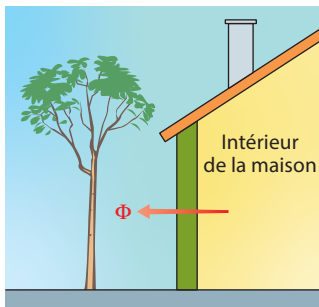
1. La température extérieure est supérieure à celle de l'habitacle du véhicule. Le transfert thermique a donc lieu depuis l'extérieur vers l'intérieur de la voiture.

2. On calcule le flux thermique :

$$\Phi = \frac{\theta_A - \theta_B}{R_{th}} = \frac{40 \text{ °C} - 22 \text{ °C}}{3,0 \times 10^{-3} \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}} = 6,0 \times 10^3 \text{ W}.$$

5 Déterminer une résistance thermique

1. Le schéma de la situation est le suivant :



2. $R_{th} = \frac{\theta_i - \theta_e}{\Phi} = \frac{19 \text{ °C} - 10 \text{ °C}}{30 \text{ W}} = 3,0 \times 10^{-1} \text{ °C} \cdot \text{W}^{-1}.$

6 Comprendre la loi de Stefan-Boltzmann

1. La grandeur T représente la température de surface du système considéré comme un corps noir.

2. p s'exprime en watt par mètre carré ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) ; T s'exprime en kelvin (K).

7 Exploiter la loi de Stefan-Boltzmann

1. On utilise la loi de Stefan-Boltzmann pour calculer la puissance surfacique :

$$p = \sigma \times T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \times (5\,778 \text{ K})^4$$

$$p = 6,32 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

2. Au niveau de la tache solaire, la température est :

$$T = \left(\frac{p}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{1,18 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}}\right)^{\frac{1}{4}} = 3,80 \times 10^3 \text{ K}.$$

8 Discuter de l'influence de l'albédo (1)

a. L'albédo est le pourcentage de la puissance solaire qui est renvoyé par le système {Terre et atmosphère}.

b. L'albédo de la glace est supérieur à celui des forêts.

c. Sans albédo, la température terrestre moyenne serait supérieure à celle avec albédo.

9 Discuter de l'influence de l'albédo (2)

1. La puissance surfacique renvoyée par le système {Terre-atmosphère} est :

$$|p_R| = p_T - p_{T(\text{abs})} = 344 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} - 241 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 103 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

On en déduit l'albédo : $\alpha = \frac{|p_R|}{p_T} = \frac{103 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{344 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} = 0,299$ soit environ 0,30.

2. Pour le sable :

$$|p_R| = \alpha \times p_T = 0,32 \times 344 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 110 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

On en déduit :

$$p_{\text{sable (abs)}} = p_T - |p_R| = 344 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} - 110 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 234 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Pour la neige :

$$|p_R| = \alpha \times p_T = 0,90 \times 344 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 310 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

On en déduit :

$$p_{\text{neige (abs)}} = p_T - |p_R| = 344 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} - 310 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Ces calculs montrent que les surfaces claires renvoient davantage d'énergie par rayonnement que les surfaces foncées (voir activité 3).

10 Comprendre la loi de Newton

S représente la surface d'échange entre le système incompressible et son environnement constitué d'un fluide ; h est le coefficient d'échange convectif ; T_e est la température extérieure loin de la surface S du système et T est la température uniforme à la surface S . h est exprimé en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; le flux est exprimé en watt (W).

11 Exploiter la loi de Newton

On utilise la loi de Newton :

$$\Phi = h \times S \times (T_e - T)$$

$$= 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \times 1,0 \text{ m}^2 \times (293 \text{ K} - 323 \text{ K})$$

$$= -3,0 \times 10^2 \text{ W}.$$

Le système perd de l'énergie. Le flux thermique à travers la paroi est dirigé du système vers l'extérieur.

12 Effectuer un bilan d'énergie (1)

1. Sur une durée courte, on peut considérer le flux Φ comme constant. On peut donc écrire : $Q = \Phi \times \Delta t$.

Ainsi, d'après la loi de Newton : $Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t$.

2. Le transfert thermique peut s'exprimer par : $Q = m \times c \times \Delta \theta$.

3. En égalisant les deux expressions trouvées précédemment, il vient :

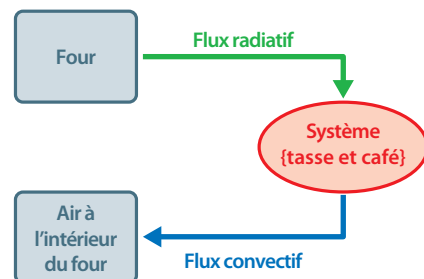
$$h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t = m \times c \times \Delta \theta \text{ soit } \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta).$$

La limite quand 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

$$\text{vérifiée par } \theta : \frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e.$$

13 Effectuer un bilan d'énergie (2)

1. Schématisation de la situation



On néglige le flux renvoyé (diffusé et réémis) par le système et le flux rayonné par l'air ambiant à la température T_e .

2. C'est l'air environnant qui échange par transfert convectif avec le système {tasse et café}.

3. Le système reçoit de l'énergie par rayonnement donc $Q_{\text{rayonnement}} > 0 \text{ J}$.

La température du système devient supérieure à la température de l'air ambiant, donc de l'énergie est perdue par le système par transfert thermique convectif avec l'air extérieur. Ainsi $Q_{\text{convection}} < 0$ J. Par application du premier principe de la thermodynamique : $\Delta U = W + Q = Q_{\text{rayonnement}} + Q_{\text{convection}}$ avec $W = 0$ J.

Le système se réchauffe. Son énergie interne augmente et ΔU est positif.

On en déduit $Q_{\text{rayonnement}} > |Q_{\text{convection}}|$.

Enfin, $\Phi_{\text{rayonnement}} > |\Phi_{\text{convection}}|$.

14 Côté maths

Résoudre une équation différentielle

1. Pour une équation différentielle de la forme :

$$y' = ay + b, \text{ les solutions sont de la forme : } y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}.$$

Par comparaison, les solutions de l'équation différentielle sont de la forme : $\theta = K \times e^{ax} + \theta_e$.

D'après les conditions initiales : $\theta(0) = K + \theta_e = \theta_i$

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, la température du gâteau est :

$$\theta = (180^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \times e^{-3,8 \times 10^{-4} \text{s}^{-1} \times 3600 \text{s}} + 20^\circ\text{C} = 61^\circ\text{C}.$$

Exercices

S'entraîner

p. 336

15 Connaître les critères de réussite

Un biberon à la bonne température

1. Le flux thermique est supposé constant pour un intervalle de temps Δt court donc : $Q = \Phi \times \Delta t$.

De plus, d'après la loi de Newton :

$$\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta), \text{ d'où } Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t.$$

2. Le système {lait} est supposé incompressible et au repos macroscopique. Il est dans l'état initial à θ_i , dans l'état final à θ_f . Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique Q donc $W = 0$ J.

D'après le premier principe de la thermodynamique, entre deux états i et f , $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$ donc $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$.

De plus, pour un système incompressible : $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta\theta$.

L'expression de la relation $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ devient donc :

$$Q = m \times c \times \Delta\theta.$$

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 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 $\frac{d\theta}{dt}$.

Ainsi : $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$; c'est l'équation différentielle vérifiée par θ .

4. Si $\theta(t) = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$ est solution de l'équation différentielle, donc elle vérifie cette équation.

$$\text{On a : } \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{d\left((\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e\right)}{dt}$$

$$\text{soit } \frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t}$$

En remplaçant θ et $\frac{d\theta(t)}{dt}$ dans l'équation, on obtient :

$$\begin{aligned} & -\frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} \\ & = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \left((\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e \right) + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e \end{aligned}$$

en simplifiant par $-\frac{h \times S}{m \times c}$, l'équation devient :

$$(\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e - \theta_e.$$

L'égalité est vérifiée, 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 du thermostat, constante. La surface doit être exprimée en m^2 .

$$\text{Donc } \theta_f = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t_f} + \theta_e.$$

$$\text{Soit } t_f = -\frac{m \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right)$$

$$= -\frac{350 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 4,2 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}{300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \times 270 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \times \ln\left(\frac{30^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}\right)$$

soit la durée nécessaire $t_f = 147$ s ou $t_f = 2,45$ min.

L'indication du fabricant « moins de 3 minutes » est conforme.

16 Un métal bien trempé

1. D'après le premier principe de la thermodynamique, entre deux états i et f , $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$ donc $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$.

De plus, pour un système incompressible : $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta\theta$.

L'expression de la relation $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ devient donc : $Q = m \times c \times \Delta\theta$.

$Q = m \times c \times \Delta\theta$ peut s'écrire, en utilisant la loi de Newton :

$$m \times c \times \Delta\theta = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t \text{ soit } \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta).$$

Lorsque Δt tend vers zéro, la limite de $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ est égale à la dérivée de θ par rapport au temps t notée $\frac{d\theta}{dt}$.

Soit $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$; c'est l'équation différentielle vérifiée par θ pour chacun des transferts thermiques.

2. a. Pour une équation différentielle de la forme $y' = a \times y + b$.

Les solutions sont de la forme : $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$.

Par comparaison, les solutions de l'équation différentielle sont :

$$\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e.$$

Dans le cas de l'étape 1 : $\theta(t=0) = K + \theta_e = \theta_0$

donc $K = \theta_0 - \theta_e$; la solution de l'équation différentielle est :

$$\theta = (\theta_0 - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e.$$

b. Pour la température finale $\theta_{\text{finale}} = \theta_1$, $t_{\text{final}} = \Delta t_1$

$$\text{soit } \theta_1 = (\theta_0 - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times \Delta t_1} + \theta_e.$$

$$\text{D'où } \Delta t_1 = -\frac{m \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_1 - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}\right);$$

$$\text{soit } \Delta t_1 = -\frac{\rho \times V \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_1 - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}\right)$$

$$\Delta t_1 = -\frac{\rho \times \frac{4}{3} \times \pi \times r^3 \times c}{h \times 4 \times \pi \times r^2} \times \ln\left(\frac{\theta_1 - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}\right)$$

$$\Delta t_1 = -\frac{\rho \times r \times c}{3 \times h} \times \ln\left(\frac{\theta_1 - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}\right).$$

$$\Delta t_1 = -\frac{3\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 15 \times 10^{-3} \text{ m} \times 1,00 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}{3 \times 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}} \times \ln\left(\frac{320^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{400^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}\right)$$

D'où $\Delta t_1 = 3,5 \times 10^2 \text{ s}$.

3. a. Dans le cas de l'étape 2, qui commence au bout de la durée Δt_1 : $\theta(t=0) = K + \theta_e = \theta_1$ donc $K = \theta_1 - \theta_e$; la solution de l'équation différentielle est :

$$\theta = (\theta_1 - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e.$$

b. Pour la température finale $\theta_{\text{finale}} = \theta_2$, $t_{\text{final}} = \Delta t_2$

$$\text{soit } \theta_2 = (\theta_1 - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times \Delta t_2} + \theta_e.$$

$$\text{De même qu'en 2, } \Delta t_2 = -\frac{m \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_2 - \theta_e}{\theta_1 - \theta_e}\right).$$

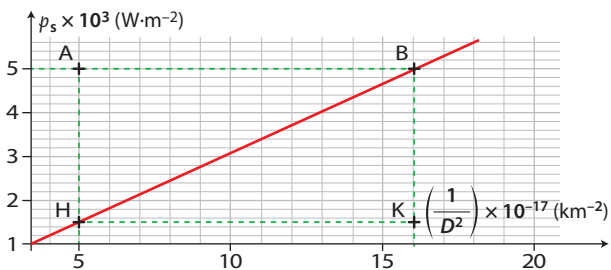
$$\text{Soit } \Delta t_2 = -\frac{\rho \times r \times c}{3 \times h_2} \times \ln\left(\frac{\theta_2 - \theta_e}{\theta_1 - \theta_e}\right).$$

$$\Delta t_2 = -\frac{3\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 15 \times 10^{-3} \text{ m} \times 1,00 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}{3 \times 6,0 \times 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}} \times \ln\left(\frac{35^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{320^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}\right)$$

$\Delta t_2 = 75 \text{ s}$.

4. C'est l'eau qui assure le refroidissement le plus rapide.

17 Puissance surfacique du rayonnement solaire



1. p_s est une fonction affine de $\frac{1}{D^2}$: $p_s\left(\frac{1}{D^2}\right) = a \times \frac{1}{D^2} + b$ où a est le coefficient directeur, b l'ordonnée à l'origine.

Graphiquement, on détermine $a = \frac{KB}{HK}$

$$\text{soit } \frac{3,4 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{11 \times 10^{-17} \times 10^{-6} \text{ m}^{-2}} = 3,1 \times 10^{25} \text{ W}.$$

On calcule l'ordonnée à l'origine :

$$b = p_s\left(\frac{1}{D^2}\right) - a \times \frac{1}{D^2} \text{ pour } \frac{1}{D^2} = 16 \times 10^{-17} \text{ km}^{-2} :$$

$$b = 5,0 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} - 3,1 \times 10^{25} \text{ W} \times (16 \times 10^{-17} \times 10^{-6}) \text{ m}^{-2}$$

$$b = 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

2. En reportant, dans l'équation de droite établie à la question 1, les distances D données, on détermine p_s .

• Dans le cas de la Terre :

$$p_s = 3,1 \times 10^{25} \text{ W} \times \frac{1}{(1,50 \times 10^{11} \text{ m})^2} + 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} ;$$

$$p_s = 1,4 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

• Dans le cas de Vénus :

$$p_s = 3,1 \times 10^{25} \text{ W} \times \frac{1}{(1,08 \times 10^{11} \text{ m})^2} + 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} ;$$

$$p_s = 2,7 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

18 À chacun son rythme

Fer à repasser

1. Le système {semelle du fer} est supposé incompressible et au repos macroscopique.

Le système est dans l'état initial à $\theta_i = 210^\circ\text{C}$, dans l'état final à θ .

Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique Q donc $W = 0 \text{ J}$.

D'après le premier principe de la thermodynamique, entre deux états i et f , $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$ donc $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$.

Or, le flux thermique est supposé constant pour un intervalle de temps Δt très court donc $Q = \Phi \times \Delta t$.

De plus, d'après la loi de Newton :

$$\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta), \text{ d'où } Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t.$$

Par ailleurs, pour un système incompressible : $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta$.

L'expression de la relation $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ devient :

$$m \times c \times \Delta \theta = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t ;$$

$$\text{soit } \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta).$$

Lorsque Δt tend vers zéro, la limite de $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ est égale à la dérivée

de θ par rapport au temps t , notée $\frac{d\theta}{dt}$, donc :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e.$$

C'est l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système.

2. Les solutions de l'équation différentielle $y' = ay + b$ ($a \neq 0$) ont pour forme : $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K un réel. Les solutions

sont donc ici de la forme : $\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$.

À l'instant initial, $\theta(0) = \theta_i$ (température de repassage d'un pantalon en coton).

D'après la solution, $\theta(0) = K + \theta_e$. On en déduit : $K = \theta_i - \theta_e$.

L'expression de la température en fonction du temps est :

$$\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e.$$

3. À l'instant final, le fer doit être à la température de repassage indiquée pour le tee-shirt en polyester :

$$\theta_f = 150^\circ\text{C}$$

Comme $\theta_f = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t_f} + \theta_e$, on en déduit :

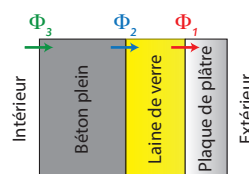
$$t_f = -\frac{m \times c}{h \times S} \times \ln\left(\frac{\theta_f - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}\right).$$

$$t_f = -\frac{500 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 450 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}{50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times 0,025 \text{ m}^2} \times \ln\left(\frac{150^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{185^\circ\text{C}}\right)$$

soit la durée nécessaire $\Delta t = t_f = 71 \text{ s}$.

19 Pertes thermiques

1. Schéma en coupe ($\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_{123}$) :



2. Le mode de transfert thermique mis en jeu est la conduction à travers les murs.

3. $R_{\text{th}} = R_{\text{th}1} + R_{\text{th}2} + R_{\text{th}3}$ soit :

$$R_{\text{th}} = 0,039^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} + 0,125^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} + 0,013^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{\text{th}} = 0,177^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}.$$

4. Pour un transfert thermique par conduction en régime permanent indépendant du temps :

$$\Phi = \frac{(\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}})}{R_{\text{th}}} \text{ d'où } \Phi = \frac{(20^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C})}{0,177^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}} = 85 \text{ W}.$$

5. Pour un simple mur en béton :

$$\Phi = \frac{(\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}})}{R_{\text{th}3}} \text{ d'où } \Phi = \frac{(20^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C})}{0,013^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}} = 1,2 \times 10^3 \text{ W}.$$

Le simple mur en béton est beaucoup moins isolant.

20 Résolution de problème

Info, intox ou igloo ?

1^{re} étape : S'approprier la question posée

La température dans l'igloo après une nuit de sommeil du randonneur est-elle de 10°C ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

- Chaque heure de son sommeil, le randonneur fournit le transfert thermique $Q_1 = 0,50 \text{ MJ}$ à l'air intérieur supposé incompressible.
- La température dans l'igloo est maintenue constante en présence du randonneur.
- L'igloo est bâti avec de la neige compactée et l'on connaît sa conductivité thermique λ .
- La résistance thermique de l'igloo a pour expression $R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$.

3^e étape : Dégager la problématique

Quelle est la température de l'air dans l'igloo compte-tenu des transferts thermiques ayant lieu ?

4^e étape : Construire la réponse

- Identifier le système étudié.
- Remarquer que l'igloo est constitué de neige compactée de conductivité thermique λ connue.
- Exprimer puis calculer la résistance thermique de l'igloo.
- Établir l'expression du flux thermique Φ sortant de l'igloo en fonction de la résistance thermique et des températures utiles.
- Établir l'expression du flux thermique Φ_1 apporté par le randonneur en fonction du transfert thermique Q_1 .
- Écrire le premier principe de la thermodynamique appliqué au système.
- En déduire une relation entre Φ_1 et Φ .
- En déduire l'expression de la température intérieure de l'igloo.
- La calculer.
- Conclure.

5^e étape : Répondre

Pour le système {air intérieur et igloo}, la résistance thermique est :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

$$R_{th} = \frac{30 \times 10^{-2} \text{ m}}{0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \times 14 \text{ m}^2} \text{ soit } R_{th} = 0,086 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \text{ avec les données indiquées.}$$

De plus, le flux thermique Φ de l'intérieur vers l'extérieur traversant la paroi de neige compactée de l'igloo est perdu pour le système donc compté négativement :

$$\Phi = \frac{(\theta_{ext} - \theta_{int})}{R_{th}} \text{ avec } (\theta_{ext} - \theta_{int}) < 0 ;$$

connaissant R_{th} et Φ , on pourra en déduire :

$$(\theta_{ext} - \theta_{int}) = \Phi \times R_{th} ;$$

$$\text{soit l'expression de } \theta_{int} = -|\Phi| \times R_{th} + \theta_{ext} .$$

Chaque heure, le randonneur transfère par rayonnement et convection un transfert thermique à l'air intérieur de l'igloo $Q_1 = 5,0 \times 10^5 \text{ J}$, ce qui correspond à un flux thermique orienté vers le système $\Phi_1 = \frac{Q_1}{\Delta t}$;

$$\text{d'où } \Phi_1 = \frac{5,0 \times 10^5 \text{ J}}{3\,600 \text{ s}} \text{ soit } \Phi_1 = +139 \text{ W.}$$

Le système {air intérieur et igloo} est supposé incompressible et au repos macroscopique ; sa variation d'énergie interne est donc : $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta_{\text{système}}$.

Le système est dans l'état initial et final à la même température maintenue constante, d'où : $\Delta \theta_{\text{système}} = 0$ et $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$.

Les deux seuls transferts d'énergie sont des transferts thermiques, Q entre le système et l'air extérieur et Q_1 entre le système et le randonneur, donc $W = 0 \text{ J}$.

Q négatif car perdu, Q_1 positif car gagné.

D'après le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q \text{ soit } \Delta U_{i \rightarrow f} = Q_1 + Q.$$

On en déduit $Q_1 + Q = 0$ ou $-Q = Q_1$ soit $\frac{Q}{\Delta t} = -\frac{Q_1}{\Delta t}$,

d'où $\Phi = -\Phi_1$ avec $\Phi_1 = 139 \text{ W}$.

On peut alors calculer $\theta_{int} = -\Phi \times R_{th} + \theta_{ext}$;

$$\theta_{int} = (-(-139 \text{ W})) \times 0,086 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} + (-15 \text{ } ^\circ\text{C}) = -3 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ au sein de l'igloo.}$$

-3 °C est une température supérieure à -10°C : le commentaire est exagéré.

21 Eau chaude sanitaire

1. a. Pour un système incompressible :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta \text{ avec } m = \rho \times V.$$

Le système {eau du ballon} est incompressible et au repos macroscopique.

Le système est dans l'état initial à 15 °C, dans l'état final à 65 °C. D'après le premier principe de la thermodynamique, appliqué au système {eau du ballon}, on a : $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$.

Le seul transfert d'énergie entre le système {eau du ballon} et le chauffe-eau est un transfert thermique Q puisque toute perte est négligée. Par ailleurs, $W = 0 \text{ J}$. Il vient $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$.

On en déduit $Q = m \times c \times \Delta \theta$ soit : $Q = \rho \times V \times c \times \Delta \theta$ en fonction des données.

D'après le premier principe de la thermodynamique appliqué au chauffe-eau puisque toute perte est négligée :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = W_{\text{élec}} + Q_{\text{donnée à l'eau}} = 0.$$

$$\text{Donc } W_{\text{élec}} = -Q_{\text{donnée à l'eau}} = Q_{\text{reçue par l'eau}} = Q.$$

$$\text{Or } W_{\text{élec}} = \mathcal{P}_{\text{élec}} \times \Delta t ; \text{ on en déduit : } \Delta t = \frac{W_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{élec}}} = \frac{Q}{\mathcal{P}_{\text{élec}}}$$

$$\text{soit } \Delta t = \frac{\rho \times V \times c \times \Delta \theta}{\mathcal{P}_{\text{élec}}}.$$

$$\Delta t = \frac{1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 200 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times 4\,180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \times (65 \text{ } ^\circ\text{C} - 15 \text{ } ^\circ\text{C})}{2\,200 \text{ W}}$$

soit la durée nécessaire à chauffer l'eau du chauffe-eau : $\Delta t = 1,9 \times 10^3 \text{ s}$ ou 5,3 h.

b. $\Delta t = 5,3 \text{ h}$, soit aussi environ 5 h 17 min. La durée concorde avec les données du constructeur.

2. a. Le flux thermique à travers les parois du ballon $\Phi = \frac{\Delta \theta}{R_{th}}$; or $R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$.

On en déduit $\Phi = \frac{(\theta_{\text{eau chaude}} - \theta_{\text{extérieur}}) \times \lambda \times S}{e}$; d'où

$$\Phi = \frac{(65 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) \times 0,036 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \times 2,9 \text{ m}^2}{70 \times 10^{-3} \text{ m}} = 67 \text{ W.}$$

b. En un jour, l'énergie perdue est $Q_{\text{perdue}} = \Phi \times \Delta t$ soit $Q_{\text{perdue}} = 67 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 1,6 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1}$.

3. Le coefficient de refroidissement du ballon est donné en $\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$.

$$\text{On en déduit } C_r = \frac{Q_{\text{perdue}}}{V \times \Delta \theta}$$

$$\text{Soit } C_r = \frac{1,6 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1}}{200 \text{ L} \times (65 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C})} = 0,18 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}.$$

C'est la valeur annoncée par le constructeur ; elle est donc cohérente.

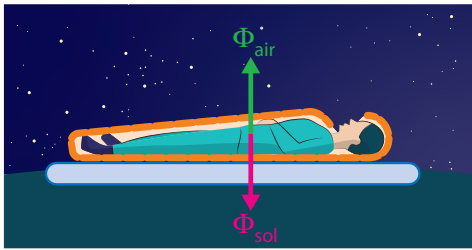
4. La réglementation impose : $C_{r \text{ max}} = 2 \times V^{-0,4}$ soit :

$$C_{r \text{ max}} = 2 \times (200 \text{ L})^{-0,4} = 0,24 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$C_r < C_{r \text{ max}}$: la législation en vigueur est respectée.

22 Bivouac à la belle étoile en montagne

1. a. Un flux thermique par conduction traverse le matelas du randonneur vers le sol et l'air : du corps le plus chaud, le randonneur, vers le plus froid, le sol et l'air. Le transfert de la partie supérieure du matelas vers l'air ambiant ne sera pas pris en compte par la suite.



b. À l'échelle microscopique, de l'énergie est échangée entre particules, des plus agitées aux moins agitées, par chocs successifs sans déplacement d'ensemble de matière.

2. a. Il faut considérer la surface qui correspond à celle occupée par le sac de couchage déployé sur le sol : $S = 1,93 \text{ m} \times 0,62 \text{ m}$ et donc $S = 1,20 \text{ m}^2$. Mais le randonneur n'occupe qu'une partie du sac et donc la seule valeur plausible est $S = 0,5 \text{ m}^2$.

b. $R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda \times S}$ et $\Phi = \frac{\Delta\theta}{R_{\text{th}}}$. On en déduit le flux thermique à travers

une face du matelas « Sleepy », $\Phi = \frac{\Delta\theta \times \lambda \times S}{e}$
soit $\Phi = \frac{(33 \text{ °C} - 3 \text{ °C}) \times 0,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times 0,5 \text{ m}^2}{1,1 \times 10^{-2} \text{ m}}$.

On obtient $\Phi = 4 \times 10^1 \text{ W}$.

c. Le flux thermique évacué à travers matelas « Randy » est plus élevé qu'à travers matelas « Sleepy ». Le matelas « Sleepy » offre de meilleures capacités d'isolation thermique.

23 CORRIGÉ Température des planètes du système solaire

1.

| Planète | Mercure | Vénus | Terre | Mars |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Distance au Soleil ($\times 10^9 \text{ m}$) | 58 | 108 | 150 | 228 |
| $p'_s (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ | $9,10 \times 10^3$ | $2,62 \times 10^3$ | $1,36 \times 10^3$ | $5,89 \times 10^2$ |

2. Une portion seulement de la puissance solaire incidente est interceptée par la planète de rayon R_p sur un disque de surface $s = \pi \times R_p^2$. On en déduit la puissance solaire incidente reçue en moyenne par le système {planète et atmosphère} : $\mathcal{P}_p = p'_s \times s$, soit $\mathcal{P}_p = p'_s \times \pi \times R_p^2$.

Comme la planète tourne sur elle-même, cette puissance se répartit sur l'ensemble de la surface S_p de la planète et son atmosphère.

D'où la puissance surfacique moyenne reçue par la planète et son atmosphère $p_p = \frac{\mathcal{P}_p}{S_p}$ donc $p_p = \frac{p'_s \times \pi \times R_p^2}{4\pi \times R_p^2}$ soit $p_p = \frac{p'_s}{4}$.

3. Par définition de l'albédo, $\alpha = \frac{|p_r|}{p_p}$; donc la puissance surfa-

cique renvoyée par la planète $|p_r| = \alpha \times p_p$; la puissance solaire surfacique moyenne absorbée par chaque planète $p_{P(\text{abs})}$ donc reçue par le sol de la planète est :

$$p_{P(\text{abs})} = p_p - \alpha \times p_p \text{ soit } p_{P(\text{abs})} = (1 - \alpha) \times p_p.$$

| Planète | Mercure | Vénus | Terre | Mars |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $p'_s (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ | $9,10 \times 10^3$ | $2,62 \times 10^3$ | $1,36 \times 10^3$ | $5,89 \times 10^2$ |
| $p_p (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ | $2,28 \times 10^3$ | $6,65 \times 10^2$ | $3,40 \times 10^2$ | $1,47 \times 10^2$ |
| Albédo α | 0,12 | 0,75 | 0,30 | 0,25 |
| $p_{P(\text{abs})} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ | $2,00 \times 10^3$ | $1,64 \times 10^2$ | $2,38 \times 10^2$ | $1,10 \times 10^2$ |

4. $p_{P(\text{abs})} = |p| = \sigma \times T^4$ et donc : $T(\text{K}) = \left(\frac{p_{P(\text{abs})}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$.

Puis $\theta(\text{°C}) = T(\text{K}) - 273$.

| Planète | Mercure | Vénus | Terre | Mars |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $p_{P(\text{abs})} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ | $2,00 \times 10^3$ | $1,64 \times 10^2$ | $2,38 \times 10^2$ | $1,10 \times 10^2$ |
| $\theta_{\text{surface}} (\text{°C})$ | 169 | 470 | 15 | -63 |
| $\theta_{\text{calculée}} (\text{°C})$ | 160 | -41,2 | -18,5 | -63,0 |

5. Les écarts sont importants pour Vénus et la Terre qui sont dotées d'une atmosphère dense et riche en gaz à effet de serre.

24 De la glace sur le sol lunaire

1. La surface du Soleil de rayon R_s est $S_s = 4\pi \times R_s^2$.

De plus, la puissance solaire émise par la surface du soleil :

$$\mathcal{P}_s = S_s \times p_s \text{ soit } \mathcal{P}_s = 4\pi \times R_s^2 \times p_s.$$

p_s est répartie sur une sphère de rayon D , D étant la distance Soleil-Lune. Cette sphère a une surface $S = 4\pi \times D^2$.

La puissance solaire surfacique p'_s à la distance D est donc :

$$p'_s = \frac{\mathcal{P}_s}{S};$$

$$\text{donc } p'_s = \frac{4\pi \times R_s^2 \times p_s}{4\pi \times D^2} \text{ soit } p'_s = \frac{R_s^2 \times p_s}{D^2}.$$

Une portion seulement de la puissance solaire incidente est interceptée par la Lune, de rayon R_L , sur un disque de surface $S = \pi \times R_L^2$.

On en déduit la puissance solaire incidente reçue en moyenne par le système {Lune} : $\mathcal{P}_L = p'_s \times s$ soit $\mathcal{P}_L = p'_s \times \pi \times R_L^2$.

Comme la Lune tourne sur elle-même, cette puissance se répartit sur l'ensemble de la surface S_L de la Lune. D'où la puissance surfa-

cique lunaire $p_L = \frac{\mathcal{P}_L}{S_L}$ donc :

$$p_L = \frac{p'_s \times \pi \times R_L^2}{4\pi \times R_L^2} \text{ soit } p_L = \frac{p'_s}{4}. \text{ On a donc } p_L = \frac{R_s^2 \times p_s}{4 \times D^2}.$$

2. a. L'albédo est $\alpha = \frac{|p_r|}{p_L} = 0,11$ donc la puissance surfacique

renvoyée par le système {Lune}, $|p_r| = \alpha \times p_L$; la puissance solaire surfacique moyenne $p_{L(\text{abs})}$ reçue par le sol lunaire (soit la Lune car elle n'a pas d'atmosphère) est donc :

$$p_{L(\text{abs})} = p_L - |p_r|$$

$$\text{soit } p_{L(\text{abs})} = p_L - \alpha \times p_L; p_{L(\text{abs})} = (1 - \alpha) \times p_L$$

$$\text{soit } p_{L(\text{abs})} = (1 - \alpha) \times \frac{R_s^2 \times p_s}{4 \times D^2}.$$

$$\text{Donc : } p_{L(\text{abs})} = (1 - 0,11) \times \frac{(6,96 \times 10^8 \text{ m})^2 \times 6,32 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{4 \times (1,50 \times 10^{11} \text{ m})^2};$$

$$p_{L(\text{abs})} = 303 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

De même,

$$p_{T(\text{abs})} = (1 - 0,30) \times \frac{(6,96 \times 10^8 \text{ m})^2 \times 6,32 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{4 \times (1,50 \times 10^{11} \text{ m})^2}$$

$$p_{T(\text{abs})} = 238 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

b. $p_{L(\text{abs})} > p_{T(\text{abs})}$. C'est la différence entre les albédos (différence liée aux couleurs des sols terrestre et lunaire) de ces deux astres qui permet d'expliquer cet écart.

3. $p_{L(\text{abs})} = p = \sigma \times T^4$ et donc $T(\text{K}) = \left(\frac{p_{L(\text{abs})}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$.

$$\text{Soit } T = \left(\frac{303 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{5,67 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} \right)^{\frac{1}{4}};$$

$T = 270 \text{ K}$ soit $\theta = -3 \text{ °C}$, ce qui est bien annoncé dans le texte introductif.

4. Il n'y a pas d'atmosphère autour de la Lune pour diffuser la lumière solaire de façon uniforme sur sa sol : l'éclairement est en « tout » ou « rien », ce qui justifie ces grandes fluctuations.

Si le relief d'un cratère fait obstacle à la lumière incidente, le sol est dans l'ombre totale et recevra donc moins d'énergie. Par suite, son rayonnement thermique sera celui d'un corps porté à une température plus « basse » que la moyenne.

5. Les zones polaires les plus sombres sont aussi les plus froides ; c'est là que la NASA a observé de la glace. Les résultats précédents sont donc compatibles avec les observations.

25 The Space Solar Power Initiative

Traduction : Le projet de la Space Solar Power Initiative (SSPI), partenariat dirigé par l'Institut de Technologie de Californie, propose de placer 2 500 satellites équipés de panneaux solaires photovoltaïques en orbite géostationnaire afin de capter l'énergie solaire et la renvoyer sur Terre.

Ce projet implique l'envoi de satellites équipés de 900 panneaux solaires, constitués d'un assemblage de tuiles, formant un immense tapis qui pourrait se plier afin de limiter l'encombrement au décollage. Une fois en orbite, ils pourraient se déplier et couvriraient alors les deux tiers d'un terrain de football. La surface totale couverte par ces panneaux solaires dépliés serait de 9 km².

L'énergie récupérée par les panneaux seraient alors transportée par micro-ondes vers des récepteurs terrestres installés dans des zones à faible densité de population (zones agricoles, lacs, déserts, etc.).

1. Déterminer la puissance solaire surfacique p'_s reçue par les panneaux à une distance D .

2. Calculer la puissance \mathcal{P} reçue par l'ensemble des panneaux, si l'on considère qu'ils sont totalement éclairés et perpendiculaires aux rayons solaires.

Réponses :

1. La surface du Soleil de rayon R_s est $S_s = 4\pi \times R_s^2$. De plus, la puissance solaire émise par la surface du Soleil est :

$$\mathcal{P}_s = S_s \times p_s \text{ soit } \mathcal{P}_s = 4\pi \times R_s^2 \times p_s.$$

\mathcal{P}_s à la distance D du Soleil (au niveau des panneaux) est répartie sur une sphère de rayon D et de surface $S = 4\pi \times D^2$.

La puissance surfacique du Soleil à une distance D est donc :

$$p'_s = \frac{\mathcal{P}_{\text{solaire}}}{S} \text{ soit } p'_s = \frac{4\pi \times R_s^2 \times p_s}{4\pi \times D^2} \text{ soit } p'_s = \frac{R_s^2 \times p_s}{D^2}$$

$$\text{avec } D = D_{\text{soleil-panneaux}} = D_{\text{Terre-Soleil}} - R_{\text{Terre}} - h \approx D_{\text{Terre-Soleil}}$$

$$p'_s = \frac{(6,96 \times 10^8 \text{ m})^2 \times 6,32 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{(150 \times 10^9 \text{ m})^2}$$

$$p'_s = 1,36 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

$$2. \mathcal{P} = p'_s \times S_{\text{panneaux}}$$

$$\mathcal{P} = 1,36 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 9 \times 10^6 \text{ m}^2$$

$$\mathcal{P} = 1,22 \times 10^{10} \text{ W} \text{ ou } 12,2 \text{ GW}.$$

Vers le Bac

p. 340

Préparation à l'écrit

26 Vitrage

Partie I

1. a. Le transfert thermique peut avoir lieu par convection ou par rayonnement.

b. Le transfert thermique Q fourni par le radiateur à la pièce pendant la durée de référence $\Delta t_{\text{réf}}$ provient intégralement du travail électrique $W_{\text{élec}}$; donc $Q = W_{\text{élec}}$.

$$\text{Or } W_{\text{élec}} = U \times I \times \Delta t_{\text{chauffage}} \text{ et } I = \frac{U}{R} \text{ soit } W_{\text{élec}} = \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{\text{chauffage}}.$$

$$\text{On sait que } \Delta t_{\text{chauffage}} = 0,10 \times \Delta t_{\text{réf}} \text{ d'où } W_{\text{élec}} = 0,10 \times \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{\text{réf}}$$

$$\text{On en déduit } Q = W_{\text{élec}} \text{ devient } Q = 0,10 \times \frac{U^2}{R} \times \Delta t_{\text{réf}}.$$

2. Un transfert thermique par conduction et convection se produit de la pièce (plus chaude) vers l'extérieur (plus froid). On a donc :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t_{\text{réf}}} = 0,10 \times \frac{U^2}{R}.$$

Application numérique :

$$\Phi = 0,10 \times \frac{(230 \text{ V})^2}{25,0 \Omega}, \text{ soit } \Phi = 212 \text{ W}.$$

$$3. \text{ On a } \Phi = \frac{T_1 - T_e}{R_{\text{th}}} \text{ et donc } R_{\text{th}} = \frac{T_1 - T_e}{\Phi}.$$

$$\text{Soit } R_{\text{th}} = \frac{293 \text{ K} - 273 \text{ K}}{212 \text{ W}};$$

$R_{\text{th}} = 0,095 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$, résistance thermique proche de $0,10 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. Le vitrage est formé de deux couches de verre entre lesquelles s'intercale une épaisseur d'argon. Ce dernier gaz est formé de « gros » atomes qui se déplacent moins vite que les molécules de diazote et dioxygène à énergies cinétiques identiques : les transferts thermiques par convection sont ainsi plus difficiles.

Partie II

1. Le système étudié {pièce et baie vitrée} est supposé incompressible et au repos macroscopique. Le système est dans l'état initial à $T_1 = 293 \text{ K}$, dans l'état final à T . Le seul transfert d'énergie entre le système et l'air extérieur est un transfert thermique Q par convection, donc $W = 0 \text{ J}$.

D'après le premier principe de la thermodynamique,

$$\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q, \text{ donc } \Delta U_{i \rightarrow f} = Q.$$

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, $\Phi = h \times S \times (T_e - T)$;

$$\text{d'où } Q = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t.$$

$$C \times \Delta T = \Phi \times \Delta t \text{ s'écrit donc aussi :}$$

$$C \times \Delta T = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$$

$$\text{ou } \frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{h \times S}{C} \times T + \frac{h \times S}{C} \times T_e.$$

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 $y' = a \times y + b$ ($a \neq 0$) a pour forme :

$$y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a} \text{ avec } K \text{ un réel.}$$

Ici, les solutions sont de la forme :

$$T = K \times e^{-\frac{h \times S}{C} \times t} + T_e.$$

Initialement, $T(0) = T_1$; il vient $T(0) = K + T_e$.

$$T_1 = K + T_e \text{ d'où } K = (T_1 - T_e).$$

On a donc finalement :

$$T = (T_1 - T_e) \times e^{-\frac{h \times S}{C} \times t} + T_e.$$

$$4. \text{ À l'état final, } t_f = -\frac{C}{h \times S} \times \ln\left(\frac{T_f - T_e}{T_1 - T_e}\right).$$

Ici $T_e = 273 \text{ K}$; $T_1 = 293 \text{ K}$ et $T_f = 289 \text{ K}$.

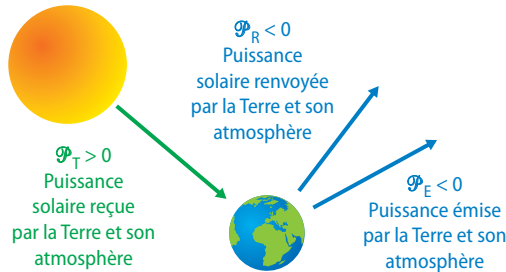
$$t_f = -\frac{100 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}}{10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \times 8,0 \text{ m}^2} \times \ln\left(\frac{289 \text{ K} - 273 \text{ K}}{293 \text{ K} - 273 \text{ K}}\right),$$

soit $\Delta t = 2,8 \times 10^2 \text{ s}$ ou environ 4 min 40 s.

27 Extinction Permien-Trias

1. a. En haute atmosphère, les poussières les plus fines et les molécules de dioxyde de soufre diffusent les rayons du Soleil et diminuent la quantité de radiations qui traversent l'atmosphère ; ce qui va accroître l'opacité atmosphérique. La puissance solaire renvoyée par diffusion ou réflexion va augmenter et l'albédo va augmenter (on suppose que la puissance solaire rayonnée incidente demeure constante donc que les cycles solaires ne varient pas pendant cette durée).

b. $\mathcal{P}_T + \mathcal{P}_R + \mathcal{P}_e = 0$.



c. $T_T = \left(\frac{p_T + p_R}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$ en ne tenant compte que de l'albédo avec $p_T > 0$ et $p_R < 0$.

Quand $\alpha_1 = 0,32$, on a $p_R = -0,32 \times p_T$ et donc $T_{T1} = \left(\frac{0,68 \times p_T}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$.

Quand $\alpha_2 = 0,36$, on a $p_R = -0,36 \times p_T$ et donc $T_{T2} = \left(\frac{0,64 \times p_T}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$.

On a donc $T_{T2} - T_{T1} = \left(\frac{p_T}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left(0,64^{\frac{1}{4}} - 0,68^{\frac{1}{4}} \right)$;

Soit $T_{T2} - T_{T1} = \left(\frac{3,5 \times 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left(0,64^{\frac{1}{4}} - 0,68^{\frac{1}{4}} \right)$;

$T_{T2} - T_{T1} = -3,8 \text{ K}$ ou $-3,8 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui est bien un refroidissement proche de $-5 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Lors du rejet de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, la quantité de gaz à effet de serre augmente ; les radiations infrarouges émises par la Terre sont renvoyées vers le sol par ces gaz à effet de serre, ce qui explique l'augmentation de la température à la surface de la Terre.

Préparation à l'ECE

1. Le mode de transfert thermique entre l'intérieur de la boîte et le milieu extérieur est la convection.

2. La présence de duvet introduit une plus grande résistance thermique ; le refroidissement doit être plus lent : la courbe rouge correspond à la cloison munie de plumes, la bleue à la cloison sans plumes.

3. L'équation différentielle vérifiée par la température du système {boîte et cloison} s'écrit également :

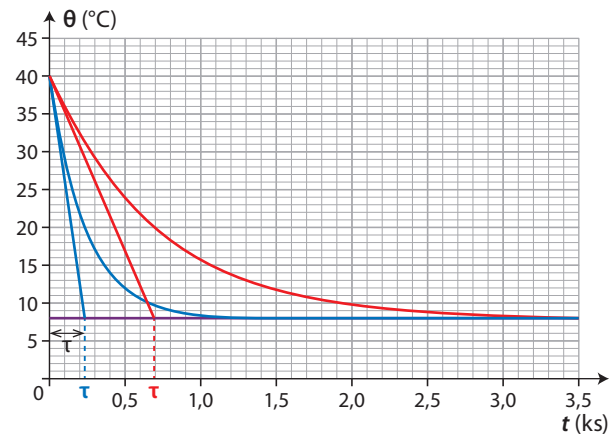
$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{\tau} \times \theta + \frac{1}{\tau} \times \theta_e$; c'est une équation différentielle du premier ordre du type $y' = ay + b$. Les solutions de l'équation différentielle $y' = ay + b$ ont pour forme :

$y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K un réel et $a \neq 0$.

Elles s'écrivent donc $\theta = K \times e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_e$.

Or à $t = 0$, $\theta(0) = \theta_i$. On a donc $K = (\theta_i - \theta_e)$, d'où la solution de l'équation : $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_e$.

4. On relève $\tau = 240 \text{ s}$ dans le premier cas, sans plumes, d'après les données et $\tau = 700 \text{ s}$ dans le second cas, avec plumes.



5. a. Sur calculatrice, on obtient la valeur moyenne $\bar{\tau} = 716 \text{ s}$; l'écart type expérimental $\sigma_{n-1} = 40 \text{ s}$. On en déduit l'incertitude-type

$u(\tau) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$ soit $u(\tau) = \frac{40 \text{ s}}{\sqrt{6}} = 16 \text{ s}$ (voir la fiche p. 454, incertitude-type, évaluation de type A).

b. $\tau = 716 \pm 16 \text{ s}$.

6. L'expérience réalisée par le groupe d'élèves confirme que le plumage constitue une surface isolante qui minimise le flux thermique traversant la paroi du milieu intérieur vers le milieu extérieur ; ceci puisque τ est plus grand en présence de plumes dans la cloison et donc le refroidissement nettement plus lent.

Vers l'oral

Je m'exprime à l'oral sur

Les transferts thermiques

• Quels sont les points positifs de l'effet de serre ?

L'effet de serre permet d'avoir une température de surface terrestre compatible avec la vie humaine. Sans effet de serre, la température moyenne extérieure serait d'environ $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'eau serait gelée.

• Quels sont les points négatifs de l'effet de serre ?

Un effet de serre trop important (provoqué par certains gaz rejetés dans l'atmosphère par l'Homme) peut être responsable d'un dérèglement climatique.

• Quels sont les trois modes de transfert thermique ?

Les trois modes de transfert thermique sont :

- la conduction ;
- la convection ;
- le rayonnement.

1. L'intérieur du logement et l'extérieur sont séparés par des parois solides. Il y a transfert par convection entre les diverses parties du fluide, transfert convectif entre le fluide et le solide en contact avec le fluide, conduction dans le solide.

2. a. Le flux thermique à travers le plafond constitué uniquement de briquettes est : $\Phi_1 = \frac{\theta_c - \theta_{\text{combles}}}{R_{\text{th}}}$

avec $R_{\text{th}} = 7,1 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$.

Ainsi, $\Phi_1 = \frac{18 \text{ }^\circ\text{C} - 5 \text{ }^\circ\text{C}}{7,1 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}} = 1,8 \times 10^3 \text{ W}$.

b. La résistance thermique $R_{\text{th}2}$ de l'association {briquettes et laine de verre} est égale à :

$$R_{\text{th}2} = 7,1 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} + 4,1 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{\text{th}2} = 4,2 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$$

Le nouveau flux thermique serait alors :

$$\Phi_2 = \frac{\theta_c - \theta_{\text{combles}}}{R_{\text{th}2}}$$

soit $\Phi_2 = \frac{18 \text{ }^\circ\text{C} - 5 \text{ }^\circ\text{C}}{4,2 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}} = 3,1 \times 10^1 \text{ W}$.

c. Le flux thermique traversant le plafond serait environ soixante fois plus faible avec la couche de laine supplémentaire que sans. L'isolation serait donc meilleure : la laine de verre est donc efficace.

3. La température de l'air intérieur fluctue très peu, environ $4 \text{ }^\circ\text{C}$ de différence, alors que la température de l'air extérieur fluctue entre $15 \text{ }^\circ\text{C}$ et plus de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, soit environ $15 \text{ }^\circ\text{C}$ de différence. L'isolation est donc satisfaisante. La laine de verre est efficace.

4. a. Le transfert thermique Q entre le système {air intérieur} et la vitre est relié au flux thermique et à la durée du transfert par $\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$ soit $Q = \Phi \times \Delta t$. Le flux est supposé constant pendant cette durée.

b. Le premier principe de la thermodynamique énonce que la variation $\Delta U_{i \rightarrow f}$ 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 à un état final, est égale à la somme des énergies échangées par le système avec l'extérieur, par travail W et/ou par transfert thermique Q : $\Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q$.

Dans cette situation, $W = 0 \text{ J}$ donc $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$.

Or lorsqu'un système incompressible de masse m et de capacité thermique massique c passe d'une température initiale θ_i à une température finale θ_f , sa variation d'énergie interne $\Delta U_{i \rightarrow f}$ a pour expression : $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$.

On obtient donc $Q = m \times c \times \Delta\theta$ (1)

c. D'après la question 4.a, $Q = \Phi \times \Delta t$.

Or d'après la loi de Newton, $\Phi = h \times S \times (\theta_{\text{vitre}} - \theta)$

$$\text{donc } Q = h \times S \times (\theta_{\text{vitre}} - \theta) \times \Delta t \quad (2)$$

En égalant (1) et (2), il vient :

$$m \times c \times \Delta\theta = h \times S \times (\theta_{\text{vitre}} - \theta) \times \Delta t$$

$$\text{d'où } \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{h \times S \times (\theta_{\text{vitre}} - \theta)}{m \times c}$$

$$\text{et donc } \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_{\text{vitre}}$$

Lorsque Δt tend vers zéro, la limite de $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ est égale à la dérivée de θ par rapport à t et est notée $\frac{d\theta}{dt}$.

On peut donc écrire :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_{\text{vitre}}$$

C'est l'équation différentielle vérifiée par la température de l'air de la chambre. Cette équation différentielle est de la forme $y' = ay + b$.

Les solutions de cette équation sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$.

Dans cette situation $a = -\frac{h \times S}{m \times c}$ et $b = \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_{\text{vitre}}$.

Les solutions sont de la forme :

$$\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} - \frac{\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_{\text{vitre}}}{-\frac{h \times S}{m \times c}}$$

$$\text{soit } \theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_{\text{vitre}}$$

Pour déterminer la constante K , il faut utiliser les conditions initiales : à $t = 0 \text{ s}$, $\theta_i = 24 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cela donne $\theta_i = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times 0} + \theta_{\text{vitre}}$.

Or $e^0 = 1$, donc $\theta_i = K + \theta_{\text{vitre}}$ soit $K = \theta_i - \theta_{\text{vitre}}$.

La relation devient : $\theta = (\theta_i - \theta_{\text{vitre}}) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_{\text{vitre}}$.

$$\text{Comme } a = -\frac{h \times S}{m \times c},$$

on obtient effectivement $\theta = (\theta_i - \theta_{\text{vitre}}) \times e^{ax} + \theta_{\text{vitre}}$.

d. Calculons $a = -\frac{h \times S}{m \times c}$

$$a = -\frac{10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 2,0 \text{ m}^2}{39 \text{ kg} \times 1,0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}} = -5,1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$\theta = (24 \text{ }^\circ\text{C} - 28 \text{ }^\circ\text{C}) \times e^{-5,1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \times 3 \text{ } 600 \text{ s}} + 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta = 27,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Il y a eu une augmentation importante de température de la pièce en une heure. La vitre n'isole pas suffisamment.

17

Sons et effet Doppler

Programme officiel

Ondes et signaux

| 1. Caractériser les phénomènes ondulatoires | |
|--|--|
| Notions et contenus | Capacités exigibles |
| | <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| Intensité sonore, intensité sonore de référence, niveau d'intensité sonore. Atténuation (en dB). | Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal. <i>Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.</i> Capacité mathématique : Utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque. |
| Effet Doppler. Décalage Doppler. | Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension. Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. <i>Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.</i> |

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

| Notions | Connaissances et savoir-faire | Modèles associés |
|---|---|---|
| PREMIÈRE Enseignement de spécialité | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Onde mécanique progressive, célérité, retard. | <ul style="list-style-type: none"> Exploiter la relation entre la durée de propagation, la distance parcourue par une perturbation et la célérité. | $v \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \rightarrow \quad v = \frac{d}{\Delta t} \quad \leftarrow \begin{array}{l} d \text{ en m} \\ \Delta t \text{ en s} \end{array}$ |
| <ul style="list-style-type: none"> Onde mécanique progressive périodique, période, longueur d'onde, relation entre période, longueur d'onde et célérité. | <ul style="list-style-type: none"> Justifier et exploiter la relation entre période, longueur d'onde et célérité. | $v \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \rightarrow \quad v = \frac{\lambda}{T} \quad \leftarrow \begin{array}{l} \lambda \text{ en m} \\ T \text{ en s} \end{array}$ |
| PREMIÈRE Enseignement scientifique | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Puissance par unité de surface d'une onde sonore. | <ul style="list-style-type: none"> La puissance par unité de surface transportée par une onde sonore est quantifiée par son intensité. Son niveau d'intensité sonore est exprimé en décibels selon une échelle logarithmique. Relier puissance sonore par unité de surface et niveau d'intensité sonore exprimé en décibels. | |
| <ul style="list-style-type: none"> Fréquence fondamentale. | <ul style="list-style-type: none"> Un signal périodique de fréquence f se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de f. Le son associé à ce signal est un son composé. f est appelée fréquence fondamentale, les autres fréquences sont appelées harmoniques. | |

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo : Double périodicité des ondes mécaniques

1. Sur le graphique, on lit : $8T = 18,2 \text{ ms}$; d'où $T = 2,28 \text{ ms}$.
La fréquence du son produit par cet instrument est :

$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{1}{2,28 \times 10^{-3} \text{ s}} = 4,40 \times 10^2 \text{ Hz}$$

2. La longueur d'onde correspondante est :

$$\lambda = \frac{v}{f} = v \times T$$

$$\lambda = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 2,28 \times 10^{-3} \text{ s} = 7,85 \times 10^{-1} \text{ m}$$

Flash test

1. C ; 2. C ; 3. A.

Activité 1

expérimentale



Tâche complexe

Atténuation des sons

Capacités exigibles

- Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.
- Mesurer un niveau d'intensité sonore.

Matériel :

- Caisson acoustique.
- Source sonore adaptée au caisson.
- Sonomètre adapté au caisson.
- Divers matériaux adaptés au caisson.
- Mètre.

Investigation

1 Étapes de la démarche de résolution :

1^{re} étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

Le niveau d'intensité sonore L se mesure à l'aide d'un sonomètre et a pour unité le décibel, dB (doc. A).

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

Comment le niveau d'intensité sonore évolue-t-il quand la distance entre la source sonore et le point de mesure est multipliée par deux ?

3^e étape : Émettre une hypothèse permettant d'y répondre

Exemple d'hypothèse : quand la distance double, le niveau d'intensité sonore est divisé par 2.

4^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

- Liste du matériel : source sonore, sonomètre, mètre.
- On choisit une distance d , puis $2d$, $4d$...
- Pour chaque distance, on mesure le niveau d'intensité sonore.

5^e étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

Lorsque la distance à la source sonore double, le niveau d'intensité sonore est diminué de 6 dB.

L'hypothèse précédente n'était donc pas correcte.

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------|---|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre que le niveau sonore change en fonction de la distance à la source sonore. | | | | |
| Analyser | <ul style="list-style-type: none"> – Choisir de mesurer des niveaux d'intensité sonores L pour des distances d doubles par rapport à la source sonore. – Comparer les niveaux d'intensité sonore et trouver une relation entre ces niveaux d'intensité sonores. – Établir l'évolution de L lorsque d double. | | | | |
| Réaliser | <ul style="list-style-type: none"> – Poser la source sonore à une extrémité de la table. – Se placer à une distance d de la source sonore ; mesurer L. – Modifier la distance entre la source et le sonomètre de façon à avoir $d' = 2d$. Mesurer L'. | | | | |
| Valider | Conclure par la validation ou non de l'hypothèse formulée. | | | | |

2 Étapes de la démarche de résolution :

1^{re} étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

Un mur antibruit est destiné à diminuer les nuisances sonores (introduction).

Le niveau d'intensité sonore L se mesure à l'aide d'un sonomètre et a pour unité le décibel dB (doc. A).

Lorsqu'une onde rencontre une paroi, seule une partie de l'énergie incidente est transmise. Le reste de l'énergie est réfléchi et/ou absorbé (doc. B).

L'atténuation sonore d'un mur antibruit est la différence entre le niveau d'intensité sonore de l'onde incidente et celui de l'onde transmise par ce mur. Plus le niveau d'intensité sonore de l'onde transmise est faible et plus le mur est efficace et plus son atténuation est grande (doc. B).

L'atténuation varie en fonction du matériau que l'on place entre la source sonore et le lieu où l'on mesure L .

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

Pour quel matériau l'atténuation des ondes sonores est-elle la plus grande ?

3^e étape : Émettre une hypothèse permettant d'y répondre

Exemples d'hypothèses :

– L'atténuation sera plus grande avec du polystyrène qu'avec du plexiglass.

– L'atténuation sera plus grande avec une épaisseur plus grande de matériau.

4^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

Liste du matériel : source sonore, sonomètre, différents matériaux avec des épaisseurs différentes.

Protocole :

- Placer le sonomètre face à la source sonore. Intercaler divers matériaux entre la source sonore et le sonomètre, toujours dans la même position.
- Mesurer le niveau d'intensité sonore sans le matériau puis avec le matériau.
- Calculer l'atténuation.

5^e étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

- À distance fixe et épaisseur fixe, le niveau d'intensité sonore dépend du matériau.
- À distance fixe et pour un même matériau, le niveau sonore diminue lorsque l'épaisseur augmente.

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|---------------------|--|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre que l'atténuation dépend du matériau. | | | | |
| Analyser | <ul style="list-style-type: none"> – Choisir de mesurer des niveaux d'intensité sonores L avec et sans matériau entre la source sonore et le capteur, pour une même distance d entre la source et le capteur. – Calculer l'atténuation pour les divers matériaux. – Comparer les résultats et conclure. | | | | |
| Réaliser | <ul style="list-style-type: none"> – Placer la source sonore à une extrémité de la caisse isolée et le capteur à l'autre extrémité. – Mesurer L. – Introduire un matériau entre la source et le capteur puis mesurer L'. – Calculer l'atténuation $A = L - L'$. – Recommencer avec d'autres matériaux/d'autres épaisseurs. | | | | |
| Valider | Conclure par la validation ou non de l'hypothèse formulée. | | | | |

Un pas vers le cours

3 Pour lutter contre les nuisances sonores, on peut s'éloigner de la source sonore ou placer entre la source sonore et le lieu où l'on entend un matériau isolant du bruit.

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Pour étudier l'influence de l'atténuation géométrique, il faudra se placer le plus loin possible des murs pour éviter toute réflexion parasite. Il est aussi préférable de surélever la source sonore et le sonomètre pour éviter les réflexions sur la paillasse.

Activité 2

expérimentale Effet Doppler et vitesse d'un véhicule p. 350

Capacités exigibles

- Déterminer la valeur de la vitesse d'un objet mobile en utilisant le décalage Doppler.
- Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.
- Mettre en œuvre un dispositif permettant de mesurer la période, la longueur d'onde, la célérité d'une onde périodique.

Matériel :

- Maquette de voiture équipée d'un émetteur sonore.
- Récepteur sonore.
- Rail avec système de lancement reproductible (élastique).
- Système d'acquisition.
- Logiciel d'analyse.

Pratique expérimentale

1 On utilise un objet mobile qui peut émettre un signal sonore. Cet objet (dans notre cas, une maquette de voiture) est placé sur

un rail pour que le mouvement soit rectiligne. Deux mesures de fréquence vont être réalisées :

– la première s'effectue lorsque l'objet est immobile. On mesure alors la fréquence f_0 de l'onde sonore émise par l'objet ;

– la deuxième s'effectue lorsque l'objet est en mouvement. On mesure la fréquence f_1 de l'onde sonore perçue lorsque le même objet se rapproche à une vitesse de valeur v constante.

On utilise un lanceur qui permet d'obtenir des conditions reproductibles de lancement.

Dans chaque cas, on utilise un logiciel d'analyse de sons.

Le doc. **A** donne l'expression du décalage Doppler :

$$\Delta f = f_1 - f_0 = \frac{v}{v_{\text{son}}} \times f_0.$$

À partir de cette expression, on isole celle de la vitesse de l'objet en mouvement :

$$v = v_{\text{son}} \times \frac{\Delta f}{f_0}.$$

On prendra comme valeur de la vitesse du signal sonore dans l'air : $v_{\text{son}} = 345 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

2 a. Exemple de résultats obtenus :

| | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_0 (Hz) | 4 151 | | | | |
| f_1 (Hz) | 4 166 | 4 185 | 4 179 | 4 170 | 4 171 |
| Δf (Hz) | 15 | 34 | 28 | 19 | 20 |
| v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1,2 | 2,8 | 2,3 | 1,6 | 1,7 |

b. On observe une dispersion des mesures. La moyenne \bar{v} de cette série de mesures est : $\bar{v} = 1,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'écart-type de cette série de mesures est $\sigma_{n-1} = 0,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'incertitude-type $u(v) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$ où n correspond au nombre de mesures faites dans les mêmes conditions. On a $n = 5$.

L'incertitude-type est donc : $u(v) = \frac{0,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\sqrt{5}} = 0,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La valeur de la vitesse de l'objet est : $v = (1,9 \pm 0,3) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Causes d'erreurs possibles :

- la valeur de la vitesse de lancement n'est pas forcément la même d'un enregistrement à l'autre ;
- la valeur de la vitesse n'est pas tout à fait constante au cours d'un enregistrement ;

- la valeur de la vitesse est calculée à partir des mesures de fréquences. Une erreur peut provenir suite à une fréquence d'échantillonnage trop basse ;
- la valeur de la vitesse du son n'est peut-être pas la bonne (liée à la température).

Remarque pour le professeur

On pourra faire réfléchir les élèves sur la pertinence de cette incertitude-type compte tenu de la précision du dispositif.

Un pas vers le cours

3 La valeur de la vitesse d'un objet peut être déterminée à partir du décalage Doppler : la mesure de la fréquence de l'onde sonore émise par l'objet à l'arrêt et celle de l'onde sonore perçue lorsque le même objet se rapproche à une vitesse de valeur constante permettent de calculer le décalage Doppler. L'expression du décalage Doppler permet de déterminer la valeur de la vitesse de l'objet.

Capsule vidéo de cours : Le décalage Doppler

QCM

p. 355

- 1. C ; 2. A ; 3. B ; 4. C ; 5. A et C ; 6. B et C ; 7. B ; 8. A ; 9. C ; 10. A.**

Exercices

Appliquer le cours

p. 358

3 CORRIGÉ Calculer un niveau d'intensité sonore

1. Le niveau d'intensité sonore est :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ soit } L = 10 \log\left(\frac{1,2 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

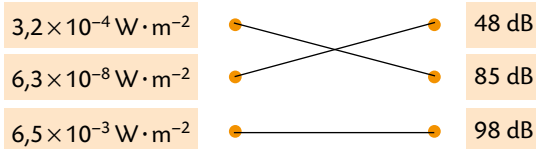
$L = 51 \text{ dB}$.

2. De même, on a $L = 79 \text{ dB}$.

3. De même, on a $L = 94 \text{ dB}$.

4 Relier L et I

1. Plus l'intensité sonore I augmente, plus le niveau sonore L augmente ; donc on peut relier L et I sans calcul par :



2. Le niveau d'intensité sonore est :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{3,2 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

soit $L = 85 \text{ dB}$.

5 CORRIGÉ Côté maths

Utiliser le logarithme décimal

1. On a $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ soit $\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{L}{10}$.

D'où $\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}$; l'intensité sonore a donc pour expression

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

2. On obtient :

| I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | L (dB) |
|--|----------|
| 1×10^{-5} | 70 |
| 2×10^{-5} | 73 |
| 1×10^{-6} | 60 |

6 CORRIGÉ Mettre en évidence une atténuation

1. Le phénomène mis en jeu est l'atténuation par absorption.

2. L'atténuation est : $A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$
donc $A = 78 \text{ dB} - 67 \text{ dB}$, soit $A = 11 \text{ dB}$.

7 Exploiter une atténuation

Avec le casque antibruit, le niveau d'intensité sonore ressenti devient :

$$L = 95 \text{ dB} - 33 \text{ dB} = 62 \text{ dB}$$

Avec les bouchons d'oreilles, le niveau d'intensité sonore ressenti devient :

$$L = 95 \text{ dB} - 26 \text{ dB} = 69 \text{ dB}$$

8 CORRIGÉ Reconnaître l'effet Doppler

Seule la situation **C** est une conséquence de l'effet Doppler.

9 Illustrer l'effet Doppler

De nombreux exemples sont possibles :

- le son émis par la sirène d'une ambulance ou de pompier s'approchant puis s'éloignant d'une personne immobile ;
- le son émis par une voiture passant devant des personnes assises dans les gradins lors d'une course automobile ;
- la réalisation d'une échographie Doppler en médecine, etc.

10 CORRIGÉ Exploiter qualitativement l'effet Doppler

On a $\lambda_R = 669,4 \text{ nm}$ et $\lambda_E = 656,3 \text{ nm}$.

On observe l'effet Doppler :

- $\lambda_R \neq \lambda_E$ donc l'étoile est en mouvement par rapport à la Terre ;
- $\lambda_R > \lambda_E$ donc l'étoile s'éloigne de la Terre.

11 Connaître l'effet Doppler

• $f_R > f_E$ est équivalent à $T_R < T_E$.

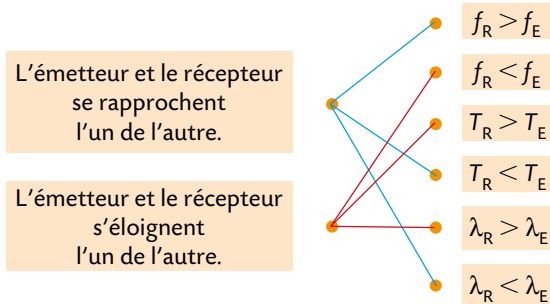
Cela implique $\lambda_R < \lambda_E$ puisque $\lambda = v_{\text{onde}} \times T$.

On a alors $\Delta f = f_R - f_E > 0$, donc E et R se rapprochent l'un de l'autre.

• $f_R < f_E$ est équivalent à $T_R > T_E$.

Cela implique $\lambda_R > \lambda_E$ puisque $\lambda = v_{\text{onde}} \times T$.

On a alors $\Delta f = f_R - f_E < 0$, donc E et R s'éloignent l'un de l'autre.



12 Identifier une expression (1)

1. Le décalage Doppler 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**.

13 Identifier une expression (2)

L'étoile se rapproche de la Terre ; on a donc $f_R > f_E$, ce qui est équivalent à $\lambda_R < \lambda_E$.

Dans l'énoncé, la longueur d'onde de l'onde émise est notée λ_0 . Celle de l'onde reçue est notée λ . Avec ces notations, on a donc $\lambda < \lambda_0$.

• Relation **a** : Comme $\lambda > 0$, il vient $\lambda_0 - \lambda < \lambda_0$.

De plus, comme $\lambda < \lambda_0$ il vient $\lambda_0 - \lambda > 0$.

Et $\lambda_0 > 0$. Donc $\frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda} > 1$.

Donc $c \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda} > c$ car $c > 0$.

Or $v < c$, donc la relation **a** n'est pas correcte.

• Relation **b** : Comme $\lambda < \lambda_0$ et $\lambda > 0$, il vient :

$$0 < \lambda_0 - \lambda < \lambda_0$$

$$\text{Donc } 0 < \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} < 1.$$

$$\text{Donc } 0 < c \times \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} < c \text{ car } c > 0.$$

Or $0 < v < c$, donc la relation **b** est correcte.

• Relation **c** : Comme $\lambda < \lambda_0$, il vient $\lambda - \lambda_0 < 0$.

$$\text{Et } \lambda_0 > 0. \text{ Donc } \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} < 0.$$

$$\text{Donc } c \times \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} < 0 \text{ car } c > 0.$$

Or $v > 0$, donc la relation **c** n'est pas correcte.

14 Calculer une valeur de vitesse

La valeur de la vitesse du véhicule est donnée par :

$$v = \frac{c \times \Delta f}{2 \times \cos \alpha \times f_E}$$

$$\text{Donc } v = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times 6,451 \times 10^3 \text{ Hz}}{2 \times \cos(20^\circ) \times 3,40 \times 10^{10} \text{ Hz}}$$

soit $v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

15 Calculer un décalage Doppler

Erratum : erreur dans le spécimen corrigé dans le manuel de l'élève.

Dans une telle situation, la valeur du décalage Doppler est donnée par :

$$\Delta f = -f_E \times \frac{v}{v_{\text{son}} + v}$$

$$\text{Soit } \Delta f = -435 \text{ Hz} \times \frac{80 \times \frac{10^3}{3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} + 80 \times \frac{10^3}{3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

D'où $\Delta f = -26 \text{ Hz}$.

Exercices

S'entraîner

p. 360

16 Avant le spectacle

1.

| | Intensité sonore I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | Niveau sonore L (dB) |
|-------------------|--|------------------------|
| Guitariste 1 | $1,0 \times 10^{-4}$ | 80 |
| Guitariste 2 | $1,0 \times 10^{-5}$ | 70 |
| Guitariste 3 | $1,0 \times 10^{-4}$ | 80 |
| Guitariste 1 et 3 | $2,0 \times 10^{-4}$ | 83 |

2. Les intensités sonores s'ajoutent ; $I = 2,1 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Le niveau sonore est : $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.

$$\text{Donc } L = 10 \log\left(\frac{2,1 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) = 83 \text{ dB}.$$

17 The Speed of the Galaxy Q2125-431

Traduction : Le décalage Doppler est un phénomène physique important que les astronomes utilisent pour mesurer les vitesses radiales des étoiles et des galaxies lointaines. La formule de base pour les mouvements lents (vitesses beaucoup plus lentes que la vitesse de la lumière) est :

$$\text{vitesse} = 299\,792 \times \frac{\lambda_0 - \lambda_r}{\lambda_r}$$

Nous considérons que cette formule est valable ici.

La vitesse de l'objet en km/s peut être trouvée en mesurant la longueur d'onde observée λ_0 du signal de l'objet, et en sachant que la longueur d'onde au repos du signal est λ_r , avec des longueurs d'onde mesurées en angströms, Å ($1 \text{ Å} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$).

Ceci est une petite partie du spectre de la galaxie Seyfert Q2125-431 dans la constellation Microscopium. Un astronome a identifié les lignes spectrales pour l'Hydrogen-Alpha ($\lambda_{r\alpha} = 6\,563 \text{ Å}$) et Beta ($\lambda_{r\beta} = 5\,007 \text{ Å}$).

<http://www.nasa.gov>

1. Calculer le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau des raies pour l'Hydrogen-Alpha et pour l'Hydrogen-Beta.

2. La galaxie Seyfert Q2125-431 s'approche-t-elle ou s'éloigne-t-elle de la Terre ?

3. Déterminer la valeur de la vitesse d'éloignement ou de rapprochement de la galaxie Q2125-431 par rapport à la Terre.

Réponses

1. Le spectre de la lumière provenant de la galaxie Q2125-431 permet d'évaluer la longueur d'onde de la raie H_{α} . Elle est égale à environ $\lambda_{0\alpha} = 7\,350 \text{ \AA}$. De plus, d'après le texte, la longueur d'onde de la raie H_{α} mesurée sur Terre pour une source au repos est $\lambda_{r\alpha} = 6\,563 \text{ \AA}$.

Le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau pour la raie H_{α} est donc :

$$\Delta\lambda = \lambda_{0\alpha} - \lambda_{r\alpha} \text{ soit } \Delta\lambda = 7\,350 \text{ \AA} - 6\,563 \text{ \AA} = 787 \text{ \AA}.$$

Pour la raie H_{β} , on a environ $\lambda_{0\beta} = 5\,430 \text{ \AA}$ et d'après le texte $\lambda_{r\beta} = 5\,007 \text{ \AA}$.

Le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau pour la raie H_{β} est :

$$\Delta\lambda = \lambda_{0\beta} - \lambda_{r\beta} \text{ soit } \Delta\lambda = 5\,430 - 5\,007 = 423 \text{ \AA}.$$

2. On a $\Delta\lambda > 0$; la galaxie Seyfert Q2125-431 s'éloigne de la Terre.

3. La valeur de la vitesse d'éloignement de la galaxie Q2125-431 par rapport à la Terre est :

$$v = 299\,792 \times \frac{\Delta\lambda}{\lambda_r}.$$

Avec la raie H_{α} , on obtient : $v = 3,59 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Avec la raie H_{β} , on obtient : $v = 2,53 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

La dispersion des valeurs laisse penser que, de façon arrondie, $v = 3 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

18 Le petit bouchon en mousse

1. Lorsque la fréquence varie, l'atténuation évolue peu pour le bouchon moulé contrairement au bouchon en mousse. Le bouchon en mousse est le bouchon pour lequel la fréquence a le plus d'influence sur l'atténuation.

2. a. Avec les bouchons en mousse, les sons aigus (sons de grandes fréquences) sont plus atténués que les sons graves. Les sons les plus aigus vont donc « manquer » dans le spectre du son perçu ; d'où une impression d'un son perçu plus grave que celui qui est émis.

b. Dans le cas des bouchons moulés, l'atténuation est approximativement la même quelle que soit la fréquence du signal reçu. Cet effet sera donc beaucoup moins ressenti avec les bouchons moulés.

3. a. Le son émis par l'avion est perçu avec un niveau d'intensité sonore de 140 dB. Ce niveau sonore est très élevé. Pour se protéger, il faut atténuer le son, quelle que soit la fréquence. Il faut donc utiliser un bouchon en mousse qui atténue beaucoup plus qu'un bouchon moulé.

b. Dans le cas d'un concert, il s'agit d'atténuer le niveau du son reçu sans déformer le message sonore et donc la composition spectrale de celui-ci : le bouchon moulé est alors le mieux adapté.

19 Connaître les critères de réussite

Au son de la corne de brume

1. Le niveau d'intensité sonore est donné par :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right).$$

$$\text{Donc } \frac{L}{10} = \log\left(\frac{I}{I_0}\right).$$

En utilisant la réciproque de la fonction logarithme, on obtient :

$$\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}. \text{ Et finalement : } I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}.$$

$$\text{Donc } I = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 10^{\frac{115 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}}$$

$$\text{soit } I = 3,2 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

2. a. Le niveau d'intensité sonore à 50 m de la corne de brume est donné par :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right). \text{ Donc } L = 10 \log\left(\frac{1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right)$$

soit $L = 80 \text{ dB}$.

b. L'atténuation géométrique du signal est $A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}}$
donc $A = 115 \text{ dB} - 80 \text{ dB}$ soit $A = 35 \text{ dB}$.

20 L'implant cochléaire

1. L'implant cochléaire comporte, à l'extérieur de l'oreille, un microphone qui reçoit l'information sonore. Celle-ci est traitée en convertissant le signal sonore en un signal électrique rayonné (antenne émettrice) puis capté par un récepteur placé sous la peau. Les électrodes dans le conduit auditif communiquent alors cette information au nerf auditif.

2. Le patient âgé de 20 ans a une audition qui correspond à celle d'une personne de 90 ans. Après une implantation cochléaire, il aurait un audiogramme similaire à celui d'une personne de 60 ans. Le diagramme d'audiométrie tonale du doc. B montre qu'à une fréquence de 4 000 Hz, il y a une perte de 80 dB pour une personne de 90 ans. La perte est de 55 dB environ pour une personne de 60 ans. Le gain auditif serait alors d'environ : $80 \text{ dB} - 55 \text{ dB} = 25 \text{ dB}$.

3. À 1 000 Hz, le gain auditif serait nettement plus faible.

21 Enceinte Bluetooth

1. L'intensité sonore I du son perçu par une personne située à 1,0 m de l'enceinte est $I = \frac{P}{S}$.

$$\text{Donc } I = \frac{0,12 \text{ W}}{4\pi \times 1,0^2 \text{ m}^2} = 1,9 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

2. Le niveau d'intensité sonore est : $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.

$$\text{Donc } L = 10 \log\left(\frac{1,9 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) = 103 \text{ dB}.$$

3. À 2,0 m de l'enceinte, l'intensité sonore du son perçu sera $I' = \frac{P}{S'}$.

$$\text{Soit } I' = \frac{0,12 \text{ W}}{4\pi \times 2,0^2 \text{ m}^2} = 4,8 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Le niveau d'intensité sonore sera : $L' = 10 \log\left(\frac{I'}{I_0}\right)$

$$\text{soit } L' = 10 \log\left(\frac{4,8 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) = 97 \text{ dB}.$$

22 Expérience historique

1. a. Le phénomène mis en jeu est l'effet Doppler.

b. Les musiciens situés au bord de la voie ferrée entendent un La#, soit une note de fréquence f_R égale à 464 Hz.

2. La valeur de la vitesse du train se déduit de l'expression du décalage Doppler : $\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{\text{onde}} - v}$.

$$\text{Il vient } \Delta f \times (v_{\text{onde}} - v) = f_E \times v.$$

$$\text{Et ensuite } \Delta f \times v_{\text{onde}} = f_E \times v + \Delta f \times v$$

$$\text{soit } v \times (f_E + \Delta f) = \Delta f \times v_{\text{onde}}. \text{ Or } \Delta f = f_R - f_E.$$

$$\text{D'où } v \times f_R = (f_R - f_E) \times v_{\text{onde}}.$$

$$\text{Ainsi } v = \frac{f_R - f_E}{f_R} \times v_{\text{onde}}.$$

$$\text{Ce qui s'écrit aussi } v = v_{\text{onde}} \times \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right).$$

$$\text{Donc } v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \left(1 - \frac{440 \text{ Hz}}{464 \text{ Hz}}\right) = 17,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

23 À chacun son rythme

Vitesse d'écoulement sanguin

1. D'après la figure A, les globules rouges se rapprochent du récepteur. On peut en déduire que la fréquence de l'onde reçue est supérieure à celle de l'onde émise : $f_R > f_E$.

D'après le doc. B, l'une de ces fréquences est égale à 10 000,0 kHz, l'autre est égale à 10 004,0 kHz.

On a donc $f_E = 10\,000,0 \text{ kHz}$.

2. Le décalage Doppler est obtenu à partir du doc. B : $\Delta f = 10\,004,0 \text{ Hz} - 10\,000,0 \text{ Hz}$ soit $\Delta f = 4,0 \text{ kHz}$.

3. La valeur de la vitesse v des globules rouges est :

$$v = \frac{\Delta f \times v_{\text{ultrason}}}{2 \times \cos \theta \times f_E}, \text{ donc } v = \frac{4,0 \times 10^3 \text{ Hz} \times 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \times \cos(45^\circ) \times 10\,000 \times 10^3 \text{ Hz}}$$

soit $v = 4,2 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

24 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'éloignement d'un émetteur

1. D'après la relation entre la valeur de vitesse, la distance parcourue et la durée de parcours : $t_2 = \frac{d}{v_{\text{onde}}}$.

2. a. De même, $d_E = v_E \times T_E$.

b. La distance qui sépare E et R est :

$$d_3 = d + d_E = d + v_E \times T_E.$$

$$c. t_4 = T_E + \frac{d_3}{v_{\text{onde}}} = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}}$$

3. $T_R = t_4 - t_2$ soit :

$$T_R = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}} - \frac{d}{v_{\text{onde}}} = T_E + \frac{v_E \times T_E}{v_{\text{onde}}} = T_E \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{\text{onde}}}\right)$$

C'est la période de l'onde reçue.

4. a. On déduit de la relation précédente : $\frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_E} \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{\text{onde}}}\right)$

$$\text{d'où } f_E = f_R \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{\text{onde}}}\right) \text{ soit } f_E = f_R \times \frac{v_{\text{onde}} + v_E}{v_{\text{onde}}}$$

b. L'expression précédente conduit à :

$$f_E \times v_{\text{onde}} = f_R \times (v_{\text{onde}} + v_E)$$

$$\text{d'où } \frac{f_E \times v_{\text{onde}}}{f_R} = v_{\text{onde}} + v_E \text{ soit } v_E = \frac{f_E \times v_{\text{onde}}}{f_R} - v_{\text{onde}}$$

$$\text{Finalement : } v_E = v_{\text{onde}} \times \left(\frac{f_E}{f_R} - 1\right) = v_{\text{onde}} \times \frac{f_E - f_R}{f_R}$$

25 Résolution de problème

Au concert

1^{re} étape : S'approprier la question posée

- Quel est le niveau d'intensité sonore de l'onde perçue par l'auditeur ?
- Peut-il rester autant qu'il veut pour écouter ce concert ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

Le doc. **A** permet de déterminer la variation du niveau d'intensité sonore en fonction de l'orientation pour une distance constante.

Le doc. **B** permet de déterminer la position de l'auditeur (distance du haut-parleur et angle par rapport à l'axe principal du haut-parleur).

Le doc. **C** nous renseigne sur les seuils de dangerosité pour l'oreille.

3^e étape : Dégager la problématique

Le son perçu par l'auditeur situé dans la position donnée par le doc. **B** pendant 2 heures respecte-t-il les normes internationales des seuils de dangerosité pour l'oreille humaine ?

4^e étape : Construire la réponse

- Déterminer la position de l'auditeur par rapport au haut-parleur.
- En déduire le niveau d'intensité sonore du son perçu.
- Vérifier si l'auditeur peut écouter le concert de 2 heures en toute sécurité.

5^e étape : Répondre

- Pour savoir si l'auditeur peut écouter le concert de 2 heures en toute sécurité, il faut déterminer le niveau sonore du son qu'il perçoit.

La distance entre l'auditeur et le haut-parleur est déterminée à l'aide de l'échelle du doc. **B** : on trouve environ 12 m.

• On calcule le niveau d'intensité sonore à cette distance : d'après le texte, à 2,0 m, le niveau d'intensité sonore est $L = 110 \text{ dB}$; l'intensité sonore est :

$$I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}} = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 10^{\frac{110}{10}}$$

soit $I = 1,0 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

L'intensité sonore I (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) est inversement proportionnelle au carré de la distance d (en m) séparant la source de l'auditeur

$$I = \frac{k}{d^2}.$$

• On calcule l'intensité sonore I' à 12 m : $I' = \frac{k}{d'^2} = \frac{I \times d^2}{d'^2}$

$$\text{soit } I' = \frac{1,0 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 2,0^2 \text{ m}^2}{12^2 \text{ m}^2} = 2,8 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Le niveau d'intensité sonore à cette distance est : $L' = 10 \log\left(\frac{I'}{I_0}\right)$.

$$\text{Donc } L' = 10 \log\left(\frac{2,8 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}\right) \text{ soit } L' = 95 \text{ dB}.$$

D'après le doc. **B**, l'auditeur est à 30° de l'axe du haut-parleur. Sur le doc. **A**, on constate que pour un angle de 30° par rapport à l'axe du haut-parleur, la variation du niveau d'intensité sonore est -6 dB . Cela ramène le niveau sonore du son perçu à 89 dB .

Le doc. **C** précise que l'on peut percevoir pendant 8 heures un son dont le niveau d'intensité sonore est égal à 85 dB . De plus, le seuil augmente de 3 dB quand la durée est divisée par 2. Il diminue donc de 3 dB quand la durée est multipliée par 2.

Cette durée sera donc de 4 heures pour 88 dB et 2 heures pour 91 dB .

L'auditeur perçoit un son dont le niveau d'intensité sonore est 89 dB , il peut donc assister au concert de 2 heures en sécurité.

26 Contrôle de vitesse

1. a. Le cinémomètre (radar) émet une onde qui est réfléchiée par la voiture en mouvement. L'effet Doppler se produit deux fois ; une première fois lorsque l'onde rencontre la voiture qui joue alors le rôle de récepteur, puis une seconde fois lorsqu'une onde réfléchiée est « émise » par la voiture qui joue alors le rôle d'émetteur de l'onde réfléchiée.

b. La voiture se rapproche du cinémomètre, donc $f_R > f_E$.

2. On exploite le document pour déterminer ces fréquences : la plus petite est f_E donc $f_E = 40,000 \text{ kHz}$ et par conséquent $f_R = 40,280 \text{ kHz}$.

3. Les relations **a** et **b** ne sont pas homogènes ; elles sont donc fausses.

De plus, on doit avoir $f_R > f_E$ or, dans la relation **c**, $\left(1 - \frac{2v}{v_S}\right) < 1$,

ce qui conduit à $f_R < f_E$. Donc la relation **c** est fautive.

La seule relation juste est donc la relation **d** car elle est homogène et donne le bon signe, et $\frac{2v}{v_S} + 1 > 1$, ce qui conduit à $f_R > f_E$.

$$\text{Donc } f_R = f_E \times \left(\frac{2v}{v_S} + 1\right).$$

4. La valeur de la vitesse v de l'objet est déterminée à partir de la relation **d** : $f_R = f_E \times \left(\frac{2v}{v_S} + 1\right)$,

$$\text{d'où } \frac{2v}{v_S} = \frac{f_R}{f_E} - 1 \text{ et donc } v = \frac{v_S}{2} \times \left(\frac{f_R}{f_E} - 1\right).$$

$$\text{D'où } v = \frac{340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2} \times \left(\frac{40,280 \text{ kHz}}{40,000 \text{ kHz}} - 1\right), \text{ soit } v = 1,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. a. La valeur de la vitesse de l'objet obtenue par vidéo est le coefficient directeur de la droite représentant la distance parcourue en fonction du temps :

$$v_{\text{vidéo}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0,26 \text{ m} - 0 \text{ m}}{0,24 \text{ s} - 0 \text{ s}} \text{ soit } v_{\text{vidéo}} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. Les valeurs de vitesse obtenues par les deux méthodes sont en accord entre elles.

27 Avion de chasse

1. Les positions successives de l'avion entre les instants t_0 et t_6 s'obtiennent à partir de la relation entre la valeur de vitesse constante, la distance parcourue et la durée de parcours : $d = v \times \Delta t$. On a ainsi :

| Position | Instant | Distance | Distance sur le schéma |
|----------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| M_0 | $t_0 = 0 \text{ s}$ | $M_0M_0 = 0 \text{ m}$ | 0,0 cm |
| M_1 | $t_1 = 0,1 \text{ s}$ | $M_0M_1 = 20 \text{ m}$ | 1,0 cm |
| M_2 | $t_2 = 0,2 \text{ s}$ | $M_0M_2 = 40 \text{ m}$ | 2,0 cm |
| M_3 | $t_3 = 0,3 \text{ s}$ | $M_0M_3 = 60 \text{ m}$ | 3,0 cm |
| M_4 | $t_4 = 0,4 \text{ s}$ | $M_0M_4 = 80 \text{ m}$ | 4,0 cm |
| M_5 | $t_5 = 0,5 \text{ s}$ | $M_0M_5 = 100 \text{ m}$ | 5,0 cm |
| M_6 | $t_6 = 0,6 \text{ s}$ | $M_0M_6 = 120 \text{ m}$ | 6,0 cm |

Le schéma complet est fait en 2. b.

2. a. L'onde se propage sur une distance $d = v_s \times \Delta t$ et $\Delta t = t_6 - t_i$; on obtient alors :

$$d_5 = v_s \times (t_6 - t_5)$$

$$d_5 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,5 \text{ s}) = 34 \text{ m}$$

soit 1,7 cm à l'échelle proposée ;

$$d_4 = v_s \times (t_6 - t_4)$$

$$d_4 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,4 \text{ s}) = 68 \text{ m}$$

soit 3,4 cm à l'échelle proposée ;

$$d_3 = v_s \times (t_6 - t_3)$$

$$d_3 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,3 \text{ s}) = 102 \text{ m}$$

soit 5,1 cm à l'échelle proposée ;

$$d_2 = v_s \times (t_6 - t_2)$$

$$d_2 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,2 \text{ s}) = 136 \text{ m}$$

soit 6,8 cm à l'échelle proposée ;

$$d_1 = v_s \times (t_6 - t_1) = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0,1 \text{ s}) = 170 \text{ m}$$

soit 8,5 cm à l'échelle proposée ;

$$d_0 = v_s \times (t_6 - t_0) = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times (0,6 \text{ s} - 0 \text{ s}) = 204 \text{ m}$$

soit 10,2 cm à l'échelle proposée.

b. Voir le schéma à la fin du chapitre.

3. À l'avant de l'avion, les fronts des ondes sphériques sont plus resserrés qu'en arrière.

Il en résulte qu'il existe deux longueurs d'onde apparentes λ' et λ'' pour un observateur terrestre. La longueur d'onde à l'avant de l'avion, λ' , est plus petite que celle à l'arrière, λ'' .

4. Pour une onde, $\lambda = \frac{v_s}{f}$, à v_s identique, plus la longueur d'onde λ est courte, plus la fréquence f est grande. Il existe donc deux fréquences f' et f'' pour un observateur terrestre.

Par rapport à la fréquence f de l'onde émise par l'avion dans le référentiel du pilote, l'observateur va entendre un son plus aigu si l'avion se rapproche de lui (car $f' > f$) et un son plus grave si l'avion s'éloigne (car $f'' < f$). C'est l'effet Doppler.

5. D'après les données, on a $\lambda' = \lambda - \frac{v}{f}$ et $\lambda'' = \lambda + \frac{v}{f}$.

$$\text{On en déduit } f' = \frac{v_s}{\lambda'} = \frac{v_s}{\lambda - \frac{v}{f}} = \frac{v_s \times f}{\lambda \times f - v} = \frac{v_s \times f}{v_s - v}$$

$$\text{soit } f' = f \times \frac{v_s}{v_s - v}$$

$$\text{Et } f'' = \frac{v_s}{\lambda''} = \frac{v_s}{\lambda + \frac{v}{f}} = \frac{v_s \times f}{\lambda \times f + v} = \frac{v_s \times f}{v_s + v} \text{ soit } f'' = f \times \frac{v_s}{v_s + v}$$

$$\text{D'où le rapport } \frac{f'}{f''} = \frac{v_s + v}{v_s - v} = \frac{340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} + 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} - 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$\text{soit } \frac{f'}{f''} = 3,86.$$

Entre le son perçu quand l'avion s'approche et celui perçu quand il s'éloigne, la fréquence est divisée par 3,86.

Vers le Bac

p. 364

Préparation à l'écrit

28 Effet Doppler et contrôle de vitesse

Partie I

1. a. Le rapport $\frac{c+v}{c}$ n'a pas d'unité donc f_1 et l'expression $f_E \times \frac{c+v}{c}$ ont la même unité : Hz, c'est-à-dire s^{-1} . L'expression est homogène.

b. Le décalage Doppler est :

$$\Delta f = f_1 - f_E = f_E \times \frac{c+v}{c} - f_E = f_E \times \left(\frac{c+v}{c} - 1 \right) = f_E \times \frac{v}{c}$$

Et $f_E \times \frac{v}{c} > 0$ donc $\Delta f > 0$ soit $f_1 > f_E$; c'est bien compatible avec le fait que la voiture (récepteur) se rapproche du radar (émetteur).

2. a. La voiture joue le rôle d'émetteur et se rapproche du radar à la vitesse de valeur v ; elle émet une onde de fréquence f_1 . La fréquence f_R des ondes reçues par le radar est déterminée en suivant la démarche du cours (paragraphe 2. b. page 353) :

$$f_R = f_1 \times \frac{c}{c-v}$$

b. Sachant que $f_1 = f_E \times \frac{c+v}{c}$, il vient :

$$f_R = f_E \times \frac{c+v}{c} \times \frac{c}{c-v} = f_E \times \frac{c+v}{c-v}$$

c. Le décalage Doppler est donné par :

$$\Delta f = f_R - f_E = f_E \times \frac{c+v}{c-v} - f_E = f_E \times \left(\frac{c+v}{c-v} - 1 \right)$$

$$\Delta f = f_E \times \left(\frac{c+v}{c-v} - \frac{c-v}{c-v} \right) = f_E \times \frac{c+v-c+v}{c-v} = f_E \times \frac{2v}{c-v}$$

De plus, si $v \ll c$, il vient $c - v \approx c$.

$$\text{Et alors on a } \Delta f = f_E \times \frac{2v}{c} = 2f_E \times \frac{v}{c}$$

3. a. L'ordre de grandeur du décalage Doppler est :

$$\Delta f = 2 \times 10^{10} \text{ Hz} \times \frac{10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 10^3 \text{ Hz}$$

b. La fréquence des ondes émises est connue avec précision. L'incertitude porte donc uniquement sur la vitesse v ;

$$u(\Delta f) = \Delta f \times \frac{u(v)}{v} = 10^3 \text{ Hz} \times \frac{0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 10^1 \text{ Hz} ;$$

l'ordre de grandeur de la précision sur 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 :

$$|\Delta f| = \frac{1}{T} \text{ donc } |\Delta f| = \frac{1}{220 \times 10^{-6} \mu\text{s}} = 4,55 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$\text{soit } |\Delta f| = 4,55 \times 10^3 \text{ Hz}$$

L'incertitude-type sur la valeur absolue du décalage Doppler est :

$$u(|\Delta f|) = |\Delta f| \times \frac{u(T)}{T} \text{ donc } u(|\Delta f|) = 4\,545 \text{ Hz} \times \frac{10 \mu\text{s}}{220 \mu\text{s}}$$

$$\text{soit } u(|\Delta f|) = 2 \times 10^2 \text{ Hz}$$

La valeur absolue du décalage Doppler est :

$$|\Delta f| = (45 \pm 2) \times 10^2 \text{ Hz.}$$

2. Le véhicule se rapproche du radar, $\Delta f > 0$.

3. a. D'après la relation donnée dans la partie I, la valeur de la vitesse du véhicule est : $v = \frac{c \times \Delta f}{2 \times f_E}$.

$$\text{Donc } v = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \times 4\,545 \text{ Hz}}{2 \times 3,0 \times 10^{10} \text{ Hz}} \text{ soit } v = 23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Son incertitude-type est $u(v) = v \times \frac{u(\Delta f)}{\Delta f}$ car c est connue précisément et on suppose qu'il en est de même pour f_E .

$$\text{Donc } u(v) = 23 \times \frac{207 \text{ Hz}}{4\,545 \text{ Hz}} \text{ soit } u(v) = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

b. Pour améliorer la précision de la détermination de la valeur de la vitesse d'un véhicule, on peut augmenter la fréquence f_E ou diminuer $u(\Delta f)$ en diminuant $u(T)$.

29 Niveau sonore et scène de concert

1. a. L'intensité sonore du son reçu par un spectateur placé à 1,0 m de l'enceinte est :

$$I = \frac{P}{S} = \frac{4,0 \times 10^{-1} \text{ W}}{4\pi \times 1,0^2 \text{ m}^2} \text{ soit } I = 6,4 \times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ (son uniformément réparti sur une demi-sphère).}$$

b. Si le spectateur est placé à 4,0 m de l'enceinte, l'intensité sonore devient :

$$I' = \frac{P}{S'} = \frac{4,0 \times 10^{-1} \text{ W}}{4\pi \times 4,0^2 \text{ m}^2} \text{ soit } I' = 4,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

2. a. Le niveau d'intensité sonore à 1,0 m de l'enceinte est :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ donc } L = 10 \log\left(\frac{6,4 \times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}\right)$$

soit $L = 108 \text{ dB}$.

À 4,0 m, le niveau d'intensité sonore sera : $L' = 10 \log\left(\frac{I'}{I_0}\right)$.

$$\text{Donc } L' = 10 \log\left(\frac{4,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}\right) \text{ soit } L' = 96 \text{ dB.}$$

Plus on s'éloigne de l'enceinte, plus le niveau sonore diminue.

b. L'atténuation géométrique est :

$$A = 108 \text{ dB} - 96 \text{ dB} = 12 \text{ dB.}$$

3. a. En plaçant une deuxième enceinte identique à la première à côté de celle-ci, les intensités sonores s'ajoutent : $I'' = 2 \times I'$.

$$\text{Donc } I'' = 2 \times 4,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ soit } I'' = 8,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

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 $L = 99 \text{ dB}$.

Vers l'oral

Je m'exprime à l'oral sur

Les sons et l'effet Doppler

• **Quel est l'intérêt de l'échelle de niveau d'intensité sonore ?**
L'échelle de niveau d'intensité sonore (L en dB) permet d'avoir des valeurs numériques plus simples à manipuler que l'échelle d'intensité sonore (I en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

• **Qu'est-ce que l'effet Doppler ?**

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.

b. La puissance sonore P répartie sur une surface S est :

$$P'' = I \times S; \text{ donc } P'' = 8,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \times \frac{4\pi \times 4,0^2 \text{ m}^2}{2}$$

$$\text{soit } P'' = 8,0 \times 10^{-1} \text{ W.}$$

On constate que P double en mettant deux enceintes identiques l'une à côté de l'autre.

Le seuil de danger est estimé à 90 dB.

• On calcule l'intensité sonore correspondant au seuil de danger :

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

$$\text{Donc } I''' = 1 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \times 10^{\frac{90 \text{ dB}}{10}}$$

$$\text{soit } I''' = 1,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

• On détermine la distance pour laquelle le spectateur n'a plus de risque auditif, la puissance sonore P'' ne variant pas. Cette surface est celle d'une demi-sphère de rayon r .

$$\text{On a donc : } S = \frac{4\pi \times r^2}{2} = \frac{P''}{I'''} \text{ d'où } r = \sqrt{\frac{2 \times P''}{4\pi \times I'''}}.$$

$$\text{Donc } r = \sqrt{\frac{2 \times 8,0 \times 10^{-1} \text{ W}}{4\pi \times 1,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}} \text{ soit } r = 11 \text{ m.}$$

Le spectateur doit être à 11 mètres de l'enceinte.

Préparation à l'ECE

1. Lorsque le véhicule est à l'arrêt, la fréquence de l'onde reçue est égale à la fréquence de l'onde émise.

L'onde émise a donc une fréquence $f_E = 514 \text{ Hz}$.

On relève $f_R = 528 \text{ Hz}$ lorsque le véhicule est en mouvement.

On en déduit le décalage Doppler :

$\Delta f = f_R - f_E = 14 \text{ Hz} > 0$: ceci est compatible avec le fait que le véhicule se rapproche de l'observateur (récepteur).

2. L'expression donnée dans le doc. B conduit à :

$$v_E = v_{\text{son}} \times \left(\frac{f_R - f_E}{f_E}\right).$$

$$\text{Donc } v_E = v_{\text{son}} \times \left(\frac{f_R - f_E}{f_E}\right) = 343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \times \frac{(528 \text{ Hz} - 514 \text{ Hz})}{514 \text{ Hz}}$$

$$\text{soit } v_E = 9,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

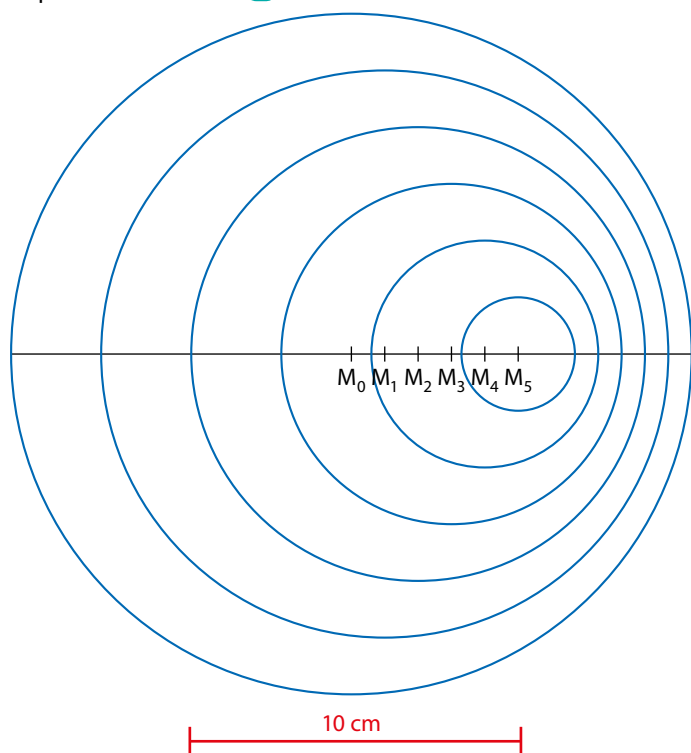
3. a. La principale source d'erreurs lors de la détermination de la valeur de la vitesse du véhicule est la position de l'observateur ; pour des mesures correctes, il devrait être dans l'axe du mouvement, ce qui n'est pas possible en pratique. On peut ajouter aussi comme sources d'erreurs possibles la valeur de la vitesse du son qui dépend des conditions extérieures ou la mesure des fréquences.

b. La zone est limitée à $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ soit $8,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; le conducteur est donc verbalisable.

• Citer quelques utilisations de l'effet Doppler.

L'effet Doppler permet de mesurer des valeurs de vitesse (automobile sur une route, sang dans les veines, galaxies dans l'Univers, etc.).

Réponse de l'exercice 27 1 et 2.b.



18

Diffraction et interférences

Programme officiel

Ondes et signaux

| 1. Caractériser les phénomènes ondulatoires | |
|--|--|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| <p>Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques.</p> <p>Angle caractéristique de diffraction.</p> | <p>Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.</p> <p><i>Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées. Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.</i></p> |
| <p>Interférences de deux ondes, conditions d'observation.</p> <p>Interférences constructives.</p> <p>Interférences destructives.</p> | <p>Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène.</p> <p><i>Tester les conditions d'interférences constructives ou destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase.</i></p> |
| <p>Interférences de deux ondes lumineuses, différence de chemin optique, conditions d'interférences constructives ou destructives.</p> | <p>Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. Établir l'expression de l'interfrange.</p> <p><i>Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.</i></p> <p>Capacité numérique : Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase à l'origine de l'un des deux.</p> |

Liens avec le programme officiel de première (enseignement de spécialité et enseignement scientifique)

| Notions | Connaissances et savoir-faire | Modèles associés |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Onde mécanique progressive, célérité, retard. Onde mécanique progressive périodique, période, longueur d'onde, relation entre période, longueur d'onde et célérité Relation entre longueur d'onde, célérité de la lumière et fréquence | <ul style="list-style-type: none"> Exploiter la relation entre la durée de propagation, la distance parcourue par une perturbation et la célérité. Justifier et exploiter la relation entre période, longueur d'onde et célérité. Citer l'ordre de grandeur des fréquences ou des longueurs d'onde des ondes de la lumière visible. | <p>v en $m \cdot s^{-1}$ $\rightarrow v = \frac{d}{\Delta t}$ $\leftarrow d$ en m Δt en s</p> <p>v en $m \cdot s^{-1}$ $\rightarrow v = \frac{\lambda}{T}$ $\leftarrow \lambda$ en m T en s</p> <p>La longueur d'onde λ et la fréquence ν d'une radiation lumineuse sont liées par :</p> <p>λ en m $\rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu}$ $\leftarrow c$ en $m \cdot s^{-1}$ ν en Hz</p> |

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

Le programme de la rentrée 2021 introduit la notion de différence de chemin optique alors que dans le programme précédent il était question de différence de marche.

Le chemin optique est la distance qui serait parcourue par une onde dans le vide pendant la même durée que celle de sa propagation dans le milieu d'indice n .

Dans le manuel, la différence de chemin optique a été notée ΔL .

Activité 1

expérimentale Le phénomène de diffraction

p. 368

Capacités exigibles

- Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées.
- Mettre en œuvre des dispositifs permettant d'étudier les phénomènes de diffraction et d'interférences.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation de sources lumineuses.

Matériel :

- Cuve à ondes avec accessoires.
- Fentes de différentes tailles pour l'étude de la diffraction des ondes lumineuses.
- Laser vert.
- Laser rouge.
- Écran.
- Support élévateur.
- Règle.

Pratique expérimentale

1 a. Dans le cas des ondes mécaniques, on utilise une cuve à ondes qui produit, grâce à un excitateur, des ondes progressives périodiques à la surface de l'eau. Ces ondes traversent ensuite une ouverture de taille a que l'on peut modifier.

Dans le cas des ondes lumineuses, on utilise un laser émettant des ondes de longueur d'onde λ qui éclaire des fentes de différentes tailles. On utilise le dispositif du doc. **B** (la distance D doit être supérieure à 1 m pour des mesures précises et pour se placer dans les conditions de diffraction de Fraunhofer).

Dans les deux cas, on détermine comment varie l'angle caractéristique de diffraction θ quand la taille de l'ouverture augmente :

on constate que l'angle caractéristique de diffraction θ diminue quand la taille de l'ouverture augmente.

b. Pour déterminer comment varie l'angle caractéristique de diffraction θ en fonction de la longueur d'onde λ , on utilise les lasers vert et rouge ; chaque laser produit des ondes de longueur d'onde λ différente et éclaire une ouverture de taille a identique. On utilise le dispositif du doc. **B**.

On constate que l'angle caractéristique de diffraction θ augmente quand la longueur d'onde de la radiation augmente.

Remarque : L'utilisation de la cuve à ondes est plus délicate pour cette partie car les observations sont plus difficiles.

2 L'angle caractéristique de diffraction θ augmente quand la longueur d'onde augmente et diminue quand la taille de l'ouverture augmente, donc la seule relation possible est **b** : $\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$.

3 La longueur d'onde correspondant à la fréquence moyenne des ondes sonores émises par l'orateur est $\lambda = \frac{v_{\text{son}}}{f} = \frac{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{800 \text{ Hz}}$; soit $\lambda = 4,31 \times 10^{-1} \text{ m}$.

L'ouverture de la porte mesure 1,0 m ; le rapport $\frac{\lambda}{a} \approx 2,3$. Ces deux grandeurs sont du même ordre de grandeur. Le phénomène de diffraction se manifeste (doc. **C**). Il est donc possible d'entendre le discours sans voir l'orateur.

Un pas vers le cours

4 Le phénomène de diffraction apparaît lorsqu'une onde mécanique ou électromagnétique passe au travers d'une ouverture de petite dimension. Il correspond à un changement de direction de l'onde. L'importance du phénomène de diffraction peut être mesurée à l'aide de l'angle caractéristique de diffraction θ .

Activité 2

expérimentale La diffraction d'une lumière monochromatique

p. 369

Capacités exigibles

- Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire.
- Mettre en œuvre des dispositifs permettant d'étudier les phénomènes de diffraction et d'interférences.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation de sources lumineuses.

Matériel :

- Rail.
- Laser rouge ou vert.
- Support élévateur.
- Fentes de différentes largeurs.
- Fente de largeur inconnue a .
- Écran.
- Règle.

Pratique expérimentale

1 D'après le schéma **B**, on a : $\tan \theta = \frac{\ell}{D} = \frac{\ell}{2 \times D}$, et pour de petits angles exprimés en radian : $\tan \theta = \theta$.

La relation s'écrit donc : $\theta = \frac{\ell}{2 \times D}$ (pour de petits angles exprimés en radian).

2 Pour de petits angles exprimés en radian, la diffraction nous donne $\theta = \frac{\lambda}{a}$ (COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE).

On peut écrire alors $\frac{\ell}{2 \times D} = \frac{\lambda}{a}$ d'où $a = \frac{2 \times D \times \lambda}{\ell}$.

• Une première méthode est une mesure unique de a relative à la fente inconnue, à partir de la relation $a = \frac{2 \times D \times \lambda}{\ell}$; la connaissance de λ et la mesure de D et de ℓ permet de déterminer a .

• Une deuxième méthode est de mesurer la largeur de la tache centrale de diffraction pour différentes fentes de largeurs a connues. On construit ensuite la représentation graphique $\ell = f\left(\frac{1}{a}\right)$ qui doit être modélisée par une fonction linéaire. On mesure ensuite la largeur ℓ de la tache de diffraction pour la fente inconnue. L'exploitation de l'équation issue de la modélisation permet de calculer a .

On peut aussi utiliser la droite obtenue qui servira de droite d'étalonnage. On porte la largeur de la tache de diffraction sur la droite d'étalonnage ; la détermination graphique de $\frac{1}{a}$ permet ensuite de calculer a .

Pour chacune des expériences, il faut placer l'écran à au moins 1 m de la fente afin d'améliorer la précision de la détermination et pour se placer dans les conditions de diffraction de Fraunhofer.

3 Les atomes, qui constituent le cristal et qui sont situés dans des plans parallèles, jouent le rôle d'objet diffractant dans l'étude de la cristallographie aux rayons X.

Un pas vers le cours

4 Le phénomène de diffraction permet de déterminer une distance à l'échelle microscopique à partir de la largeur de la tache centrale de diffraction. Pour cela, on utilise la relation entre a , D , λ et ℓ ou une représentation graphique $\ell = f\left(\frac{1}{a}\right)$ qui servira de droite d'étalonnage.

Activité 3

expérimentale



Tâche complexe

Les interférences lumineuses

p. 370

Capacités exigibles

- Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.
- Mettre en œuvre des dispositifs permettant d'étudier les phénomènes de diffraction et d'interférences.
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation de sources lumineuses.

Investigation

1 Étapes de la démarche de résolution :

1^{re} étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

1. L'interfrange i est la distance séparant les centres de deux franges brillantes consécutives ou les centres de deux franges sombres consécutives (COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE).

2. La relation qui relie l'interfrange i , la longueur d'onde λ , la distance b entre les fentes et la distance D entre les deux fentes et l'écran est donnée par : $i = \frac{\lambda \times D}{b}$ (COMPLÉMENT SCIENTIFIQUE).

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

La longueur d'onde de la lumière émise par le laser est-elle conforme à celle annoncée sur l'étiquette ?

3^e étape : Émettre une hypothèse permettant d'y répondre

L'étude quantitative d'une figure d'interférences devrait permettre de mesurer assez précisément la longueur d'onde de la lumière émise par le laser.

4^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

Liste du matériel : laser, fentes d'Young, caméra, écran gradué, mètre (ou banc d'optique gradué), ordinateur avec logiciel de traitement d'images.

Protocole :

- Aligner le laser, les fentes d'Young et l'écran.
- Positionner la caméra de manière à obtenir l'image de la figure obtenue sur l'écran.
- Capter l'image.
- Mesurer la distance D entre les fentes d'Young et l'écran.
- Déterminer l'interfrange i en exploitant la capture avec le logiciel.
- Déterminer la longueur d'onde λ de la radiation à partir de la relation : $\lambda = \frac{i \times b}{D}$.

5^e étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

On compare la longueur d'onde mesurée expérimentalement à celle indiquée sur l'étiquette du laser.

On contrôle sa conformité.

La photographie de la figure obtenue (image act3-interferences.jpg) est disponible au téléchargement.

Ressource pour le professeur à télécharger :
Image act3-interferences.jpg

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------------|--|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre que la détermination de la longueur d'onde λ dépend de la mesure de l'interfrange i , de la distance entre les fentes b et de la distance D entre les fentes et l'écran. | | | | |
| Analyser-Raisonner | – Choisir de mesurer l'interfrange i à partir de la figure d'interférences et d'un logiciel de traitement d'images. – Utiliser un grand nombre de franges pour augmenter la précision de la mesure de i . | | | | |
| Réaliser | – Placer l'écran à une distance suffisamment grande de l'écran. – Placer correctement la caméra pour faire une capture sans déformation de la figure d'interférences. – Mesurer l'interfrange en utilisant la figure et les outils du logiciel. – Calculer la longueur d'onde de la radiation du laser. | | | | |
| Valider | Conclure sur la longueur d'onde mesurée expérimentalement et celle indiquée sur l'étiquette du laser. | | | | |

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

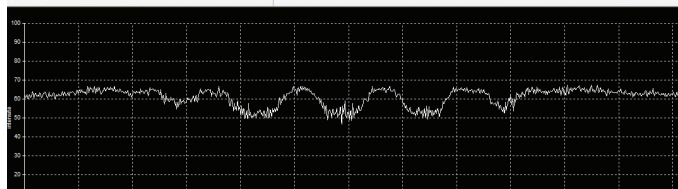
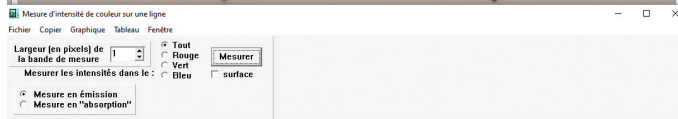
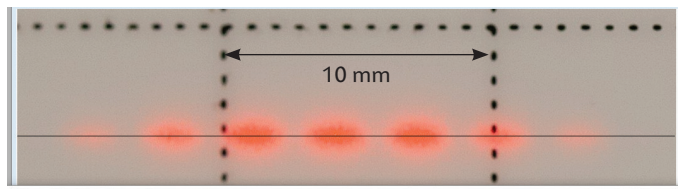
On peut proposer différents coups de pouce :

Coup de pouce 1 : la relation donnant l'interfrange i permet d'isoler la longueur d'onde λ .

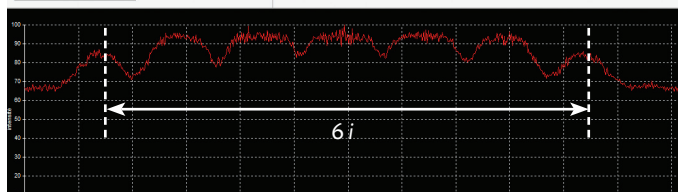
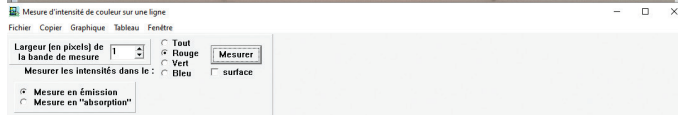
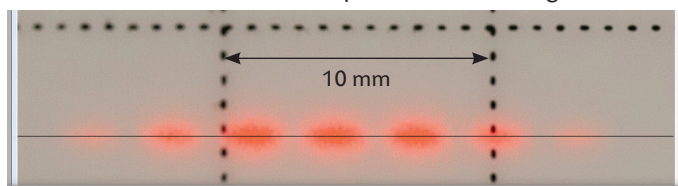
Coup de pouce 2 : on mesure l'interfrange à partir d'une capture d'écran de la figure d'interférences. Pour cela, l'image sera exploitée par un logiciel de traitement d'images.

Coup de pouce 3 : on mesure i en utilisant plusieurs franges à l'aide d'un logiciel comme *Mesurim*.

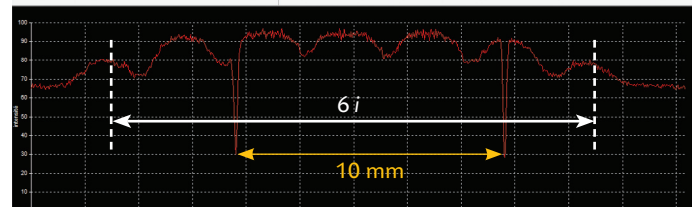
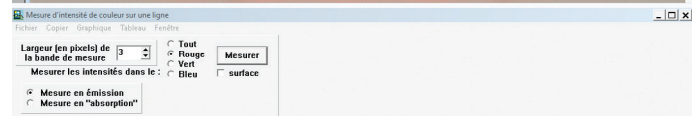
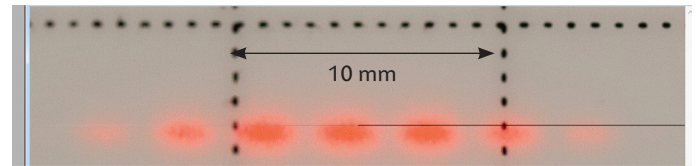
En mesurant l'intensité lumineuse le long d'une ligne sur l'ensemble des canaux RVB, on obtient des minima d'intensité pour les taches rouges :



En mesurant l'intensité lumineuse sur le canal R uniquement, on obtient des maxima d'intensité pour les taches rouges :



Si on aligne la ligne de mesure avec les repères d'échelle, on obtient des minima pour ces repères. Cela permet de vérifier la bonne définition de l'échelle sur le logiciel :



Exemple de résultats obtenus pour $D = 140 \text{ cm}$, $b = 0,30 \text{ mm}$ et avec $6i = 17,9 \text{ mm}$.

$$\text{Cela conduit à } i = \frac{17,9 \text{ mm}}{6} = 2,98 \text{ mm}.$$

Coup de pouce 4 : on détermine la longueur d'onde en faisant attention aux unités : $\lambda = \frac{i \times b}{D}$.

$$\text{Donc } \lambda = \frac{2,98 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,30 \times 10^{-3} \text{ m}}{1,40 \text{ m}} = 6,4 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

Remarque : il est souvent difficile de connaître *a priori* par des données du constructeur la longueur d'onde d'une diode laser rouge qui est peu monochromatique.



On peut utiliser un spectrophotomètre correctement étalonné pour déterminer la longueur d'onde.

Un pas vers le cours

2 La longueur d'onde d'une radiation peut être déterminée à partir du phénomène d'interférences. La mesure de l'interfrange et l'exploitation de la relation entre i , λ , b et D permet d'isoler et de calculer la longueur d'onde.

Capsule vidéo de cours : Différence de chemin optique

QCM

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

p. 375

Exercices

Appliquer le cours p. 378

3 Identifier le phénomène de diffraction (1)

Lorsqu'un laser éclaire une fente de petite taille, on observe le phénomène de diffraction. Il apparaît sur l'écran une tache lumineuse (nommée tache centrale) et des taches moins larges réparties de part et d'autre de la tache centrale.

4 Identifier le phénomène de diffraction (2)

Le phénomène de diffraction intervient dans la situation a.

5 Illustrer le phénomène de diffraction

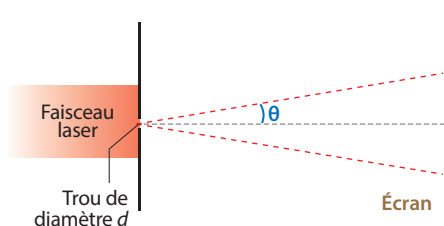
On peut observer des phénomènes de diffraction avec des vagues qui pénètrent dans un port protégé par des digues, en acoustique avec une personne que l'on entend derrière une porte entrouverte, en optique avec la lumière sur un CD ou la lumière à travers un rideau, etc.

6 Connaître un phénomène

Lorsqu'un mur antibruit présente une petite ouverture, il y a un phénomène de diffraction. Les riverains peuvent alors entendre le bruit de la circulation.

7 Calculer un angle caractéristique de diffraction

1.



On obtient des anneaux de diffraction avec une tache centrale nettement plus lumineuse que les autres.

2. L'angle caractéristique de diffraction est :

$$\theta = 1,22 \times \frac{\lambda}{a} \text{ d'où } \theta = 1,22 \times \frac{532 \times 10^{-9} \text{ m}}{30 \times 10^{-6} \text{ m}} ;$$

$$\text{soit } \theta = 2,2 \times 10^{-2} \text{ rad.}$$

8 Exploiter l'angle caractéristique de diffraction

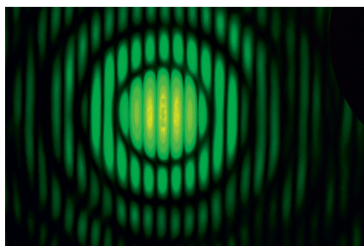
| | | |
|---------------------------|-------------------|----------------------|
| θ (10^{-3} rad) | 0,50 | 0,82 |
| λ (nm) | $1,3 \times 10^4$ | 1,7 |
| a (cm) | 2,7 | $2,1 \times 10^{-4}$ |

9 Reconnaître le phénomène d'interférences

Le phénomène d'interférences intervient dans le cas **a** ; on a des interférences destructives.

10 Décrire un phénomène d'interférences

- Le phénomène observé est le phénomène d'interférences.
- On observe des franges d'interférences équidistantes disposées au sein de la figure de diffraction d'un trou circulaire (anneaux concentriques) comme ci-dessous par exemple.



Le phénomène d'interférences est le plus visible au niveau de la tache centrale.

11 Reconnaître des ondes

1. Pour observer un phénomène d'interférences, il faut deux sources en phase.

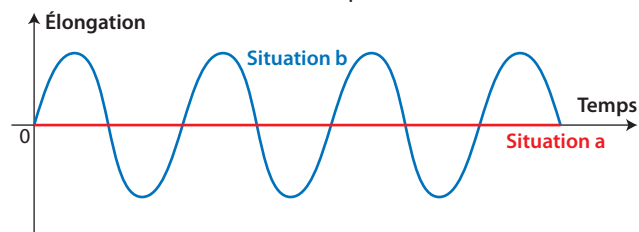
2. Le flotteur (A) est sur une frange où l'amplitude varie beaucoup lors de la propagation des ondes (alternance de zones colorées en bleu et d'autres en noir). L'élongation de l'onde résultante est maximale ; les interférences sont constructives. Cette situation correspond à la courbe (a).

Le flotteur (B) est sur une frange où l'amplitude ne varie pas lors de la propagation des ondes (zone colorée en gris). L'élongation de l'onde résultante est petite ; les interférences sont destructives. La surface de l'eau est quasiment immobile. Cette situation correspond à la courbe (b).

12 Reconnaître des signaux en phase ou en opposition de phase

1. Les ondes sont en opposition de phase dans la situation (a) et en phase dans la situation (b).

2. Les ondes résultantes dans chaque situation sont :



13 Connaître le phénomène d'interférences

1. Pour observer des interférences, il faut que les deux ondes lumineuses qui se superposent proviennent de deux sources ponctuelles en phase.

2. a. Pour observer des interférences constructives, la différence de chemin optique doit être telle que :

$$\Delta L = k \times \lambda_0 \text{ où } k \text{ est un entier relatif.}$$

b. Pour observer des interférences destructives, la différence de chemin optique doit être telle que :

$$\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0.$$

14 Déterminer la position des franges brillantes et des franges sombres

1. Au point O, la différence de chemin optique est $\Delta L = 0$; on a donc une condition d'interférences constructives ($\Delta L = k \times \lambda_0$ avec $k = 0$). On observera donc une frange brillante.

2. Au point P, on a $\Delta L = 1,625 \mu\text{m}$.

On calcule $\frac{\Delta L}{\lambda_0} = \frac{1,625 \times 10^{-6} \text{ m}}{650 \times 10^{-9} \text{ m}}$ soit $\frac{\Delta L}{\lambda_0} = 2,5$, ce qui correspond à un nombre demi-entier.

Donc $\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0$ avec $k = 2$. Les interférences sont destructives et on observe une frange sombre.

15 Identifier une expression

1. L'expression de x_k est $x_k = \frac{\Delta L \times D}{b}$.

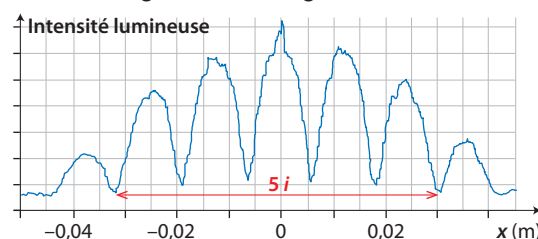
2. Prenons une frange brillante de rang k , on a alors $\Delta L_k = k \times \lambda_0$; pour une frange brillante de rang $k + 1$, on a $\Delta L_{k+1} = (k + 1) \times \lambda_0$. L'interfrange i a pour expression :

$$i = x_{k+1} - x_k \text{ d'où } i = \frac{(k + 1) \times \lambda_0 \times D}{b} - \frac{k \times \lambda_0 \times D}{b}$$

$$\text{soit } i = \frac{\lambda_0 \times D}{b}.$$

16 Calculer un interfrange

On mesure sur la figure l'interfrange i .



On a : $5i = (0,031 \text{ m} - (-0,032 \text{ m})) = 0,063 \text{ m}$ d'où $i = 13 \text{ mm}$.

17 Calculer une longueur d'onde

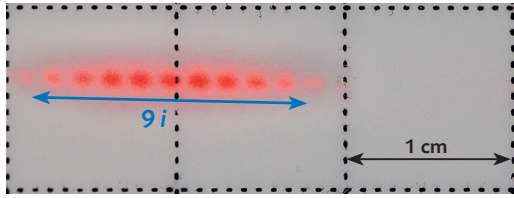
1. La longueur d'onde a pour expression : $\lambda = \frac{i \times b}{D}$.

$$2. \lambda = \frac{6,3 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,20 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,0 \text{ m}} = 6,3 \times 10^{-7} \text{ m}$$

soit environ 630 nm.

18 Calculer la distance séparant deux fentes

Sur la figure, on lit $9i = 1,6 \text{ cm} = 0,016 \text{ m}$ soit $i = 1,8 \times 10^{-3} \text{ m}$.



La distance b est $b = \frac{\lambda \times D}{i}$.

Donc $b = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m} \times 1,4 \text{ m}}{1,8 \times 10^{-3} \text{ m}}$ soit $b = 5,1 \times 10^{-4} \text{ m}$.

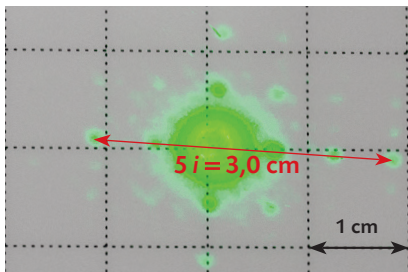
Exercices

S'entraîner

p. 380

19 Mesure de la taille d'un pixel d'un écran de smartphone

1. L'interfrange i est obtenu à partir de la figure d'interférences :



On a : $5i = 3,0 \text{ cm}$ d'où $i = 0,60 \text{ cm}$.

2. La largeur d'un pixel est $a = \frac{\lambda \times D}{i}$.

Donc $a = \frac{532 \times 10^{-9} \text{ m} \times 1,24 \text{ m}}{0,60 \times 10^{-2} \text{ m}}$ soit $a = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}$. La largeur d'un pixel est environ 0,11 mm.

20 À chacun son rythme

Les effets de la houle

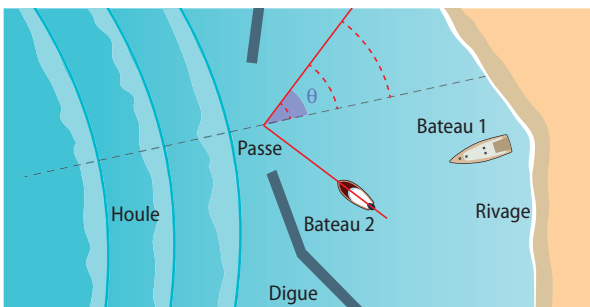
1. La longueur d'onde de la houle est $\lambda = 30 \text{ m}$; la taille de l'ouverture est $a = 40 \text{ m}$.

2. a. Le phénomène de diffraction est pris en compte si la longueur d'onde de la houle et la taille de l'ouverture sont du même ordre de grandeur, ce qui est le cas ici. On peut donc prendre en compte le phénomène de diffraction.

b. L'angle caractéristique de diffraction est donné par $\sin \theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{30 \text{ m}}{40 \text{ m}}$.

Donc $\sin \theta = \frac{30 \text{ m}}{40 \text{ m}} = 0,75$, ce qui conduit à $\theta = 49^\circ$.

c. On trace l'angle caractéristique de diffraction sur le schéma :

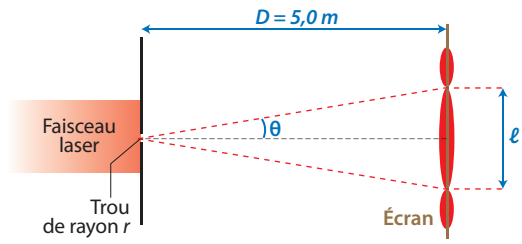


3. Le bateau 2 est sur la ligne d'extinction, il est mieux protégé que le bateau 1.

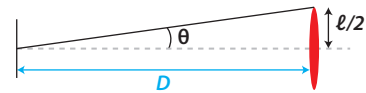
21 Connaître les critères de réussite

Pointeur laser

1.



2. L'expression de l'angle caractéristique θ s'obtient à partir de la tache centrale de largeur (diamètre) ℓ .



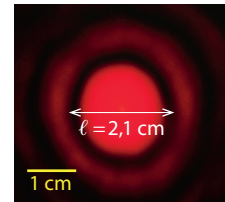
D'après le schéma, on a : $\tan \theta = \frac{\ell}{2D} = \frac{\ell}{2D}$; pour de petits angles exprimés en radian, $\tan \theta = \theta$ d'où $\theta = \frac{\ell}{2D}$.

De plus, pour une ouverture circulaire de rayon r et une longueur d'onde 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 $\lambda_R = \frac{r \times \ell}{1,22 D}$.

3.



On relève à partir de l'échelle de la photographie : $\ell = 2,1 \text{ cm}$. La longueur d'onde des radiations émises par la diode laser est donc :

$$\lambda_R = \frac{0,20 \times 10^{-3} \text{ m} \times 2,1 \times 10^{-2} \text{ m}}{1,22 \times 5,0 \text{ m}}, \lambda_R = 6,9 \times 10^{-7} \text{ m}$$

soit $\lambda_R \approx 690 \text{ nm}$.

4. La largeur de la tache centrale est donnée par la relation $\ell = 2,44 \times \frac{\lambda \times D}{2r}$. On a $\lambda_V < \lambda_R$ donc $\ell_V < \ell_R$. La largeur de la tache centrale sera plus petite avec un pointeur laser émettant des radiations de longueur d'onde λ_V .

22 Côté maths et Python

Somme de signaux sinusoïdaux

Ressources pour le professeur à télécharger :

- Fichier Python
- Explication du programme en langage Python

1. Les deux signaux sinusoïdaux sont synchrones par le fait que l'on déclare dans chacun des deux signaux la même période T (lignes 25 et 26).

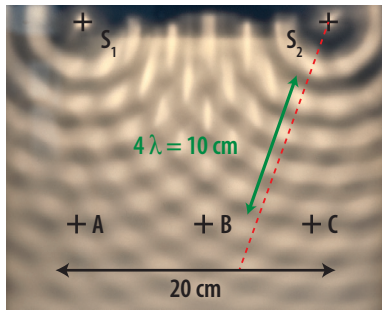
2. y_1 possède une phase à l'origine qui est nulle (ligne 25).

3. a. Pour que l'amplitude du signal soit maximale, il faut avoir les deux signaux en phase, donc avoir le déphasage nul.

b. Pour que l'amplitude du signal soit nulle, il faut que les deux signaux aient la même amplitude et soient en opposition de phase, donc avoir un déphasage de π .

23 Interférences à la surface de l'eau

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. En un point M quelconque du milieu, on note $d_1 = S_1M$ et $d_2 = S_2M$.

Pour observer des interférences constructives, il faut que :

$$d_2 - d_1 = k \times \lambda.$$

Pour observer des interférences destructives, il faut que :

$$d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda.$$

Au point A, $d_2 - d_1 = 9,2\text{ cm}$. On a donc $\frac{d_2 - d_1}{\lambda} = 3,7$, ce qui peut être arrondi à 3,5, cela correspond à des interférences destructives

car $d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$.

Au point B, $d_2 - d_1 = 0\text{ cm}$. On a des interférences constructives pour $k = 0$.

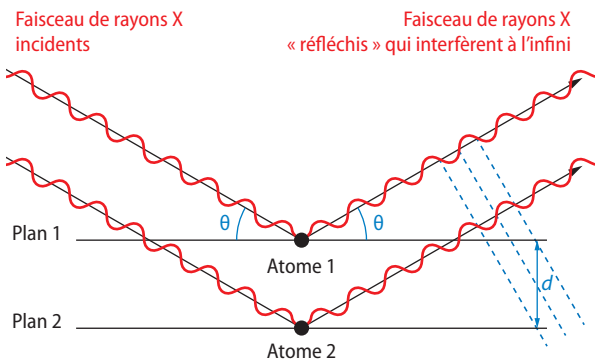
Au point C, $d_2 - d_1 = -7,7\text{ cm}$. On a $\frac{d_2 - d_1}{\lambda} \approx -3$, cela correspond à des interférences constructives car $d_2 - d_1 = k \times \lambda$.

24 Rayons X et structure cristalline

1. Les interférences sont constructives si les ondes qui se superposent sont en phase.

Les interférences sont destructives si les ondes qui se superposent sont en opposition de phase.

2. D'après le schéma, les ondes réfléchies par les atomes 1 et 2 sont en phase, donc les interférences seront constructives.



3. Pour des interférences constructives et une différence de chemin optique minimale, on a $\Delta L = \lambda_0$. Cette différence est obtenue pour $k = 1$.

La distance d entre deux plans d'atomes 1 et 2 voisins dans un cristal est donnée par la relation :

$$d = \frac{\Delta L}{2 \times \sin \theta} \text{ soit } d = \frac{\lambda_0}{2 \times \sin \theta}.$$

$$\text{Donc } d = \frac{0,154 \times 10^{-9} \text{ m}}{2 \times \sin(10,4^\circ)} = 4,27 \times 10^{-10} \text{ m soit } d = 0,427 \text{ nm}.$$

25 Couleurs interférentielles des paons

1. Les interférences sont constructives si la différence de chemin optique est telle que $\Delta L = k \times \lambda_0$ où k est un entier relatif. Les

interférences sont destructives si la différence de chemin optique est telle que $\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0$.

2. a. Pour une radiation de longueur d'onde dans l'air λ_R , la différence de chemin optique est :

$$\Delta L_R = 2 n_R \times e \times \cos r + \frac{\lambda_R}{2}.$$

$$\text{Donc } \Delta L_R = 2 \times 1,33 \times 0,15 \times 10^{-6} \text{ m} \times \cos(20^\circ) + \frac{750 \times 10^{-9} \text{ m}}{2}$$

$$\text{soit } \Delta L_R = 7,5 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

On a dans ce cas $\frac{\Delta L_R}{\lambda_R} = \frac{7,5 \times 10^{-7} \text{ m}}{750 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1$, cela correspond à

un nombre entier ($k = 1$) ; les interférences de deux rayons sont donc constructives.

Pour une radiation de longueur d'onde λ_V , la différence de chemin optique est :

$$\Delta L_V = 2 n_V \times e \times \cos r + \frac{\lambda_V}{2}$$

$$\Delta L_V = 2 \times 1,34 \times 0,15 \times 10^{-6} \text{ m} \times \cos(20^\circ) + \frac{380 \times 10^{-9} \text{ m}}{2}$$

$$\text{soit } \Delta L_V = 5,7 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

On a dans ce cas $\frac{\Delta L_V}{\lambda_V} = \frac{5,7 \times 10^{-7} \text{ m}}{380 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1,5$, cela correspond à

un nombre demi-entier. Les interférences sont donc destructives.

b. L'observateur percevra le rouge car pour le rouge les interférences sont constructives.

3. Si on change l'angle d'observation, on modifie la différence de chemin optique. Par conséquent, les conditions d'interférences constructives ou destructives n'auront plus lieu pour les mêmes radiations. Les couleurs perçues seront alors changeantes.

4. Lorsque les couleurs des plumes des oiseaux sont dues aux pigments (couleurs pigmentaires), elles sont perçues par tous les observateurs de la même manière, quel que soit l'angle d'observation, ce qui n'est pas le cas des couleurs interférentielles comme on vient de l'étudier avec le paon.

Pour vérifier expérimentalement la nature d'une couleur pigmentaire ou interférentielle de plumes d'oiseaux, il suffit de fixer les plumes d'un oiseau et de changer l'angle d'observation ; si pour la même plume sa couleur reste identique quel que soit l'angle d'observation, on a une couleur de plumes de nature pigmentaire.

26 Interfrange et longueur d'onde

1. a. On observe une frange brillante au point P si $\Delta L = k \times \lambda_0$ où k est un entier relatif.

b. On observe une frange sombre au point P si $\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0$.

2. L'interfrange i est la différence entre les abscisses consécutives x_k et x_{k+1} de deux points pour lesquels on observe des interférences de même type :

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\Delta L_{k+1} \times D}{b} - \frac{\Delta L_k \times D}{b}.$$

Prenons une frange brillante de rang k , on a $\Delta L_k = k \times \lambda_0$; pour une frange brillante de rang $k + 1$, on a $\Delta L_{k+1} = (k + 1) \times \lambda_0$.

$$\text{Il vient alors } i = \frac{(k + 1) \times \lambda_0 \times D}{b} - \frac{k \times \lambda_0 \times D}{b} \text{ soit } i = \frac{\lambda_0 \times D}{b}.$$

3. La longueur d'onde λ_0 de la radiation émise par le laser est :

$$\lambda_0 = \frac{i \times b}{D}$$

$$\lambda_0 = \frac{6,0 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,20 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,00 \text{ m}}$$

$$\lambda_0 = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m soit } \lambda = 600 \text{ nm}.$$

L'incertitude-type sur la longueur d'onde est :

$$u(\lambda_0) = \lambda_0 \times \sqrt{\left(\frac{u(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{u(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}.$$

$$u(\lambda_0) = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m} \times \sqrt{\left(\frac{0,1 \text{ mm}}{6,0 \text{ mm}}\right)^2 + \left(\frac{0,01 \text{ mm}}{0,20 \text{ mm}}\right)^2 + \left(\frac{0,01 \text{ m}}{2,00 \text{ m}}\right)^2}$$

$$u(\lambda_0) = 4 \times 10^{-8} \text{ m}.$$

4. L'encadrement de la longueur d'onde est :
 $5,6 \times 10^{-7} \text{ m} < \lambda_0 < 6,4 \times 10^{-7} \text{ m}.$

27 Wavelength influence on diffraction

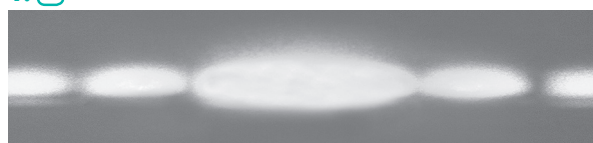
Traduction : Au cours d'une expérience de diffraction, l'image **a** a été obtenue. En changeant simplement le laser, on a obtenu l'image **b**.

1. À quelle image correspond le laser de plus grande longueur d'onde ?

2. La longueur d'onde de la lumière émise par l'un des lasers est de 650 nm et les deux lasers émettent un rayonnement dans la zone visible. Quelle est la longueur d'onde du deuxième laser ?

Réponses :

1. **a**



L'angle de diffraction étant petit, on a $\frac{\lambda}{a} = \frac{\ell}{2D}$.

Pour a et D fixes, la largeur de la tache centrale de diffraction augmente avec la longueur d'onde. C'est donc le cliché **b** qui se rapporte au laser de plus grande longueur d'onde.

2. On a $\frac{\lambda}{\ell} = \frac{a}{2D} = \text{constante}$ (a et D fixes) ; on peut donc écrire

$$\frac{\lambda_R}{\ell_R} = \frac{\lambda_i}{\ell_i} \text{ où } \lambda_R \text{ se rapporte au laser du cliché } \mathbf{a} \text{ correspondant}$$

à 650 nm et λ_i correspondant à la longueur d'onde inconnue.

On mesure sur les figures : $\ell_R = 2,4 \text{ cm}$ et $\ell_i = 2,0 \text{ cm}$.

La longueur d'onde λ_i est $\lambda_i = \ell_i \times \frac{\lambda_R}{\ell_R}$

$$\text{Donc } \lambda_i = 2,0 \text{ cm} \times \frac{650 \text{ nm}}{2,4 \text{ cm}} \text{ soit } \lambda_i = 5,4 \times 10^2 \text{ nm}.$$

28 Lecture d'un disque optique Blu-ray

1. Les interférences sont constructives si la différence de chemin optique est telle que $\Delta L = k \times \lambda_0$ où k est un entier relatif.

Les interférences sont destructives si la différence de chemin optique est telle que $\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0$.

2. **a.** Dans le cas **a**, les deux rayons (1) et (2) parcourent la même distance dans le même milieu de propagation ; la différence de chemin optique ΔL entre ces deux rayons est donc nulle. Les interférences entre les rayons (1) et (2) sont donc constructives.

b. Dans le cas **b**, la différence de chemin optique ΔL entre les deux rayons est $\Delta L = 2n \times h$; h correspond à la distance entre un creux et un plat, donc cela correspond à la profondeur d'un creux. Si les interférences sont destructives, alors :

$$\left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0 = 2n \times h.$$

$$\text{La distance } h \text{ est : } h = \frac{\left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0}{2n}.$$

La distance minimale est obtenue pour $k = 0$;

$$d'ou \ h_{\min} = \frac{\lambda_0}{2n} = \frac{405 \times 10^{-9} \text{ m}}{2 \times 1,55} = 6,53 \times 10^{-8} \text{ m}.$$

Vers le Bac

p. 384

Préparation à l'écrit

29 Observation d'une exoplanète

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 :

$$\frac{r}{d_{\text{Terre-étoile}}} > 1,22 \times \frac{\lambda}{D} \text{ soit } D > \frac{1,22 \times \lambda \times d_{\text{Terre-étoile}}}{r}.$$

$$\text{On obtient } D > \frac{1,22 \times 2,0 \times 10^{-6} \text{ m} \times 230 \times 9,461 \times 10^{15} \text{ m}}{55 \times 1,496 \times 10^{11} \text{ m}}.$$

Soit $D > 0,65 \text{ m}$. Le diamètre D de l'ouverture du télescope doit être supérieur à 0,65 m.

30 Les fentes d'Young

1. Pour observer une telle figure, c'est-à-dire des interférences stables, il faut avoir des ondes issues de sources ponctuelles en phase que l'on obtient expérimentalement, à l'aide d'ouvertures éclairées par une même source. C'est le cas du dispositif des fentes d'Young.

2. **a.** On obtient une frange brillante si la différence de chemin optique est telle que $\Delta L = k \times \lambda_0$ où k est un entier relatif.

b. L'interfrange i est la différence entre les abscisses consécutives x_k et x_{k+1} de deux points pour lesquels on observe des interférences de même type :

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\Delta L_{k+1} \times D}{b} - \frac{\Delta L_k \times D}{b}.$$

Prenons une frange brillante de rang k ; on a $\Delta L_k = k \times \lambda_0$; pour une frange brillante de rang $k + 1$, on a $\Delta L_{k+1} = (k + 1) \times \lambda_0$.

$$\text{Il vient alors } i = \frac{(k + 1) \times \lambda_0 \times D}{b} - \frac{k \times \lambda_0 \times D}{b} \text{ soit } i = \frac{\lambda_0 \times D}{b}.$$

Calculons l'interfrange :

$$i = \frac{\lambda_0 \times D}{b} = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m} \times 1,50 \text{ m}}{0,20 \times 10^{-3} \text{ m}} = 4,9 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

$$\text{On a : } \frac{\ell}{i} = \frac{10 \times 10^{-2} \text{ m}}{4,9 \times 10^{-3} \text{ m}} = 20.$$

Le nombre maximal de franges brillantes sur l'écran est 20.

Préparation à l'ECE

1. Ce phénomène est le phénomène de diffraction.

2. D'après le schéma, on a : $\tan \theta = \frac{\ell}{2 \times D}$. De plus, comme l'angle θ est petit, $\tan \theta = \theta$ (en radian) d'où $\theta = \frac{\ell}{2 \times D}$.

L'angle θ étant petit, on a aussi $\sin \theta = \theta$ (en radian) et donc $\theta = \frac{\lambda}{a}$.

$$\text{On peut écrire alors } \frac{\ell}{2 \times D} = \frac{\lambda}{a} \text{ d'où } \lambda = \frac{\ell \times a}{2 \times D}.$$

3. a. La longueur d'onde λ de la radiation émise par le laser est :

$$\lambda = \frac{4,2 \times 10^{-2} \text{ m} \times 60,0 \times 10^{-6} \text{ m}}{2 \times 2,00 \text{ m}} = 6,3 \times 10^{-7} \text{ m}$$

soit environ 630 nm.

L'incertitude-type sur la longueur d'onde est :

$$u(\lambda) = \lambda \times \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(\ell)}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}$$

$$u(\lambda) = 630 \times 10^{-9} \text{ m} \times \sqrt{\left(\frac{0,1 \mu\text{m}}{60,0 \mu\text{m}}\right)^2 + \left(\frac{0,1 \text{ cm}}{4,2 \text{ cm}}\right)^2 + \left(\frac{0,1 \text{ m}}{2,0 \text{ m}}\right)^2}$$

$u(\lambda) = 4 \times 10^{-8} \text{ m}$ en arrondissant par excès.

b. L'encadrement de la longueur d'onde est :
 $5,9 \times 10^{-7} \text{ m} < \lambda < 6,7 \times 10^{-7} \text{ m}$.

c. L'indication du constructeur pour la longueur d'onde est 630 à 650 nm ; l'encadrement obtenu est compatible avec celui du constructeur.

4. La largeur ℓ de la tache centrale de diffraction diminue lorsque la largeur a de la fente augmente puisque : $\ell = \frac{2 \times \lambda \times D}{a}$. La largeur de la fente **b** est donc plus grande que celle de la fente **a**.

Vers l'oral

p. 386

Je m'exprime à l'oral sur

La diffraction et les interférences

• **À quelle condition, peut-il y avoir phénomène de diffraction ?**

Le phénomène de diffraction s'observe lorsque les dimensions de l'ouverture sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde pour une onde mécanique et de plusieurs dizaines de longueurs d'onde pour une radiation.

• **Comment repérer l'interfrange sur une figure d'interférences ?**

L'interfrange est la distance séparant les centres de deux franges brillantes ou les centres de deux franges sombres consécutives. Pour minimiser l'erreur, on mesure souvent plusieurs interfranges.

• **Définir des interférences constructives et destructives.**

Les interférences sont constructives si la différence de chemin optique ΔL est :

$$\Delta L = k \times \lambda_0 \text{ avec } k \in \mathbb{Z}.$$

Les interférences sont destructives si la différence de chemin optique ΔL est :

$$\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0 \text{ avec } k \in \mathbb{Z}.$$

19

La lunette astronomique

Programme officiel

Ondes et signaux

| 2. Former des images, décrire la lumière par un flux de photons | |
|---|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles |
| <i>Activités expérimentales support de la formation</i> | |
| A) Former des images | |
| Modèle optique d'une lunette astronomique avec objectif et oculaire convergents. Grossissement. | Représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes ; identifier l'objectif et l'oculaire. Représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale. Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale. Exploiter les données caractéristiques d'une lunette commerciale. <i>Réaliser une maquette de lunette astronomique ou utiliser une lunette commerciale pour en déterminer le grossissement. Vérifier la position de l'image intermédiaire en la visualisant sur un écran.</i> |

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

| Notions | Connaissances et savoir-faire | Modèles associés |
|---|---|---|
| SECONDE | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Lentilles, modèle de la lentille mince convergente : foyers, distance focale. Image réelle d'un objet réel à travers une lentille mince convergente. Grandissement. L'œil, modèle de l'œil réduit. | <ul style="list-style-type: none"> Caractériser les foyers d'une lentille mince convergente à l'aide du modèle du rayon lumineux. Utiliser le modèle du rayon lumineux pour déterminer graphiquement la position, la taille et le sens de l'image réelle d'un objet-plan réel donnée par une lentille mince convergente. Définir et déterminer géométriquement un grandissement. Modéliser l'œil. <i>Produire et caractériser l'image réelle d'un objet-plan réel formée par une lentille mince convergente.</i> | <p>Sans unité $\rightarrow \gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA}$ \leftarrow Longueurs exprimées dans la même unité</p> <p>L'œil, modèle de l'œil réduit.</p> |
| PREMIÈRE | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Relation de conjugaison d'une lentille mince convergente. Grandissement. Image réelle, image virtuelle, image droite, image renversée. | <ul style="list-style-type: none"> Exploiter les relations de conjugaison et de grandissement fournies pour déterminer la position et la taille de l'image d'un objet-plan réel. Déterminer les caractéristiques de l'image d'un objet-plan réel formée par une lentille mince convergente. <i>Estimer la distance focale d'une lentille mince convergente.</i> <i>Tester la relation de conjugaison d'une lentille mince convergente.</i> <i>Réaliser une mise au point en modifiant soit la distance focale de la lentille convergente soit la géométrie du montage optique.</i> | $\frac{1}{x_{A'}} - \frac{1}{x_A} = \frac{1}{f'}$ $\gamma = \frac{y_{B'}}{y_B} = \frac{x_{A'}}{x_A}$ |

Commentaires sur la stratégie pédagogique proposée

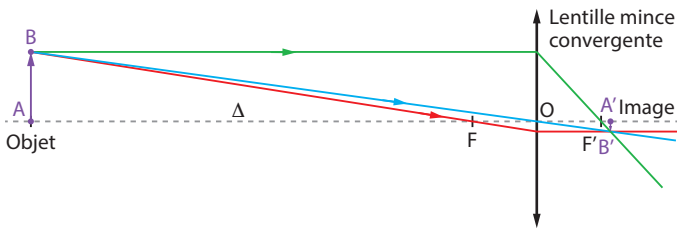
Dans la continuité de la classe de première, les mesures algébriques \overline{OA} et $\overline{OA'}$ sont notées x_A et $x_{A'}$. La correspondance est rappelée à l'élève dans la page « Vu en 1^{re} », p. 388. Ce choix a été motivé par souci de simplification et d'harmonisation avec les formulations que l'élève peut être amené à rencontrer en mathématiques.

Il est possible que les deux types d'écriture soient rencontrés dans les sujets d'examen.

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo de cours : Formation d'une image

1. et 2.



3. Utilisons la relation de conjugaison : $\frac{1}{x_{A'}} - \frac{1}{x_A} = \frac{1}{f'}$ pour calculer l'abscisse $x_{A'}$ de l'image.

$$\frac{1}{x_{A'}} = \frac{1}{x_A} + \frac{1}{f'}$$

$\frac{1}{x_{A'}}$ tend vers $\frac{1}{f'}$ car $\frac{1}{x_A}$ tend vers 0.
Donc $x_{A'} \rightarrow f'$.

La construction de la question 2. confirme le résultat obtenu, car nous observons que le point A' est très proche du foyer image F'.

Flash test

1. B ; 2. A ; 3. B.

Activité 1

expérimentale Une maquette de lunette afocale

Capacités exigibles

- Représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes ; identifier l'objectif et l'oculaire.
- Représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale.
- Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale.
- Exploiter les données caractéristiques d'une lunette commerciale.
- Réaliser une maquette de lunette astronomique ou utiliser une lunette commerciale pour en déterminer le grossissement.
- Vérifier la position de l'image intermédiaire en la visualisant sur un écran.
- Estimer la distance focale d'une lentille mince convergente.
- Réaliser un montage optique comportant une ou deux lentilles minces.

Matériel :

- Banc d'optique.
- Lentilles minces de 20 cm et 5 cm de distance focale sur support.
- Règle graduée, décimètre.
- Écran avec support.
- Objet lumineux (nous avons choisi une photographie de la Lune au format A4, éclairée par une source lumineuse).

Pratique expérimentale

1 L'image d'un objet lointain se forme dans le plan perpendiculaire à l'axe optique et contenant son foyer image. Pour observer l'image d'un objet lointain, il faut placer un écran perpendiculaire à l'axe optique au niveau du foyer image de la lentille objectif, soit à 20 cm de la lentille. L'image est plus petite que l'objet. De plus, elle est renversée par rapport à l'objet.

2 Il faut placer la lentille oculaire sur l'axe optique de telle manière que le foyer image de la lentille objectif et le foyer objet de l'oculaire soient confondus. La lunette est alors dite afocale. Pour observer l'image, il faut placer l'œil derrière l'oculaire. L'image apparaîtra agrandie et renversée par rapport à l'image intermédiaire.

3 Le grossissement G d'une lunette est défini par $G = \frac{\theta'}{\theta}$.

Dans le triangle $O_1A_1B_1$, rectangle en A_1 , $\tan \theta = \frac{A_1B_1}{A_1O_1}$ et dans

le triangle $O_2A_1B_1$, rectangle en A_1 , $\tan \theta' = \frac{A_1B_1}{A_1O_2}$.

Calculons les angles θ et θ' . Pour cela, il faut mesurer la taille de l'image intermédiaire A_1B_1 .

$$A_1O_1 = O_1F_1 = 20 \text{ cm et } A_1O_2 = O_2F_2 = 5 \text{ cm.}$$

Pour une image mesurée $A_1B_1 = 1,0 \text{ cm}$:

$$\tan \theta = \frac{A_1B_1}{A_1O_1} = \frac{1,0 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = 0,050 \text{ soit } \theta = 0,050 \text{ rad ;}$$

$$\tan \theta' = \frac{A_1B_1}{A_1O_2} = \frac{1,0 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} = 0,2 \text{ soit } \theta' = 0,2 \text{ rad ;}$$

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{0,2 \text{ rad}}{0,05 \text{ rad}} = 4.$$

4 a. Comme les angles θ et θ' sont petits, il est possible de les évaluer avec leurs tangentes respectives.

$$\text{Donc } \tan \theta = \theta = \frac{A_1B_1}{A_1O_1} \text{ et } \tan \theta' = \theta' = \frac{A_1B_1}{A_1O_2}.$$

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\frac{A_1B_1}{A_1O_2}}{\frac{A_1B_1}{A_1O_1}} = \frac{A_1O_1}{A_1O_2}.$$

Comme la lunette est afocale, $A_1O_1 = f'_1$ et $A_1O_2 = f'_2$.

En conclusion, $G = \frac{f'_1}{f'_2}$.

b. L'expression du grossissement $G = \frac{f'_1}{f'_2}$ montre que pour que

G soit plus important, il faut que l'oculaire ait une distance focale f'_2 plus petite.

Un pas vers le cours

5 Le grossissement d'une lunette astronomique est défini par $G = \frac{\theta'}{\theta}$. Pour une lunette afocale, le grossissement s'exprime

aussi par $G = \frac{f_1'}{f_2}$ où f_1' et f_2 sont, respectivement, les distances focales de l'objectif et de l'oculaire.

Capsule vidéo de cours : Construction du faisceau

QCM

p. 393

1. A ; 2. C ; 3. A ; 4. B ; 5. A ; 6. A ; 7. B ; 8. A ; 9. B ; 10. A ; 11. A.

Exercices

Appliquer le cours

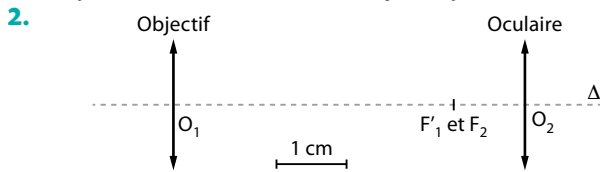
p. 396

2 Reconnaître la schématisation d'une lunette afocale

C'est la configuration **a** : les foyers image F_1' de l'objectif et objet F_2 de l'oculaire sont confondus et la lumière traverse l'objectif puis l'oculaire, ce qui n'est pas le cas dans la configuration **c**.

3 Schématiser une lunette afocale

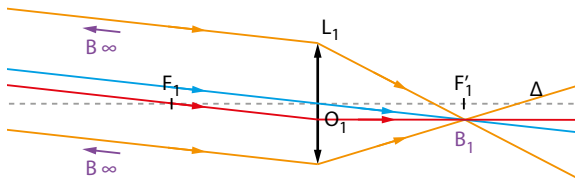
1. Une lunette astronomique afocale est constituée de deux lentilles minces convergentes, l'objectif et l'oculaire. Les deux lentilles ont le même axe optique. La distance focale de l'objectif est supérieure à la distance focale de l'oculaire. Le foyer image de l'objectif est confondu avec le foyer objet de l'oculaire.



4 Identifier un faisceau lumineux

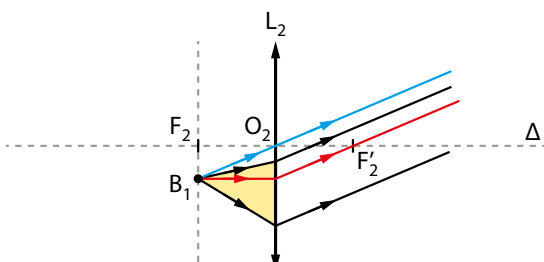
1. C'est la configuration **b** : l'objectif reçoit un faisceau parallèle issu d'un objet situé à l'infini.

2. Construction :

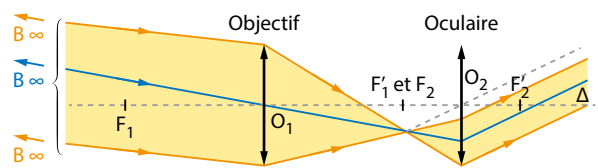


5 Représenter un faisceau lumineux émergent

On trace d'abord le rayon lumineux (B_1O_2) qui n'est pas dévié par la lentille. Ensuite, on trace le rayon passant par B_1 et parallèle à l'axe optique qui converge vers F_2' . Ces deux rayons émergents sont parallèles, ils donnent la direction du faisceau émergent. On complète alors le tracé des rayons donnés par l'énoncé.



6 Représenter le faisceau émergent d'une lunette afocale



7 Connaître quelques caractéristiques d'un faisceau lumineux

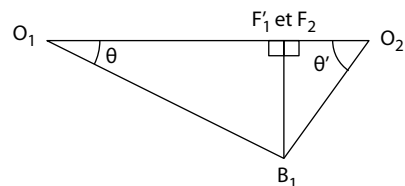
- a** Affirmation correcte.
- b** Affirmation correcte.
- c** Le point B_1 se situe dans le plan perpendiculaire à l'axe optique contenant le foyer objet de la lentille modélisant l'oculaire de la lunette ce qui revient aussi à dire que le point B_1 se situe dans le plan perpendiculaire à l'axe optique contenant le foyer image de la lentille modélisant l'objectif.
- d** Le faisceau émergent de l'oculaire est toujours un **faisceau parallèle**.

8 Côté maths

Manipuler une tangente

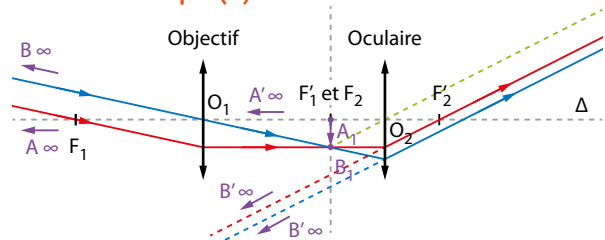
1. D'après le schéma, $\tan \theta = \frac{F_1'B_1}{O_1F_1'}$.

2. a. En appliquant la définition de θ' donnée dans l'énoncé :



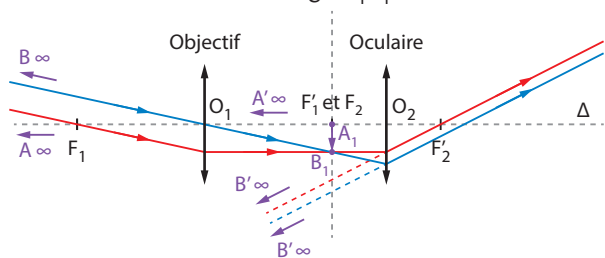
b. Il faut que l'angle θ' soit petit et exprimé en radian (inférieur à 0,3 rad, soit 17°).

9 Tracer l'image d'un objet situé à l'infini donnée par une lunette astronomique (1)



10 Tracer l'image d'un objet situé à l'infini donnée par une lunette astronomique (2)

1. et 2. a. Construction de l'image A_1B_1 :



b. L'oculaire donne une image $A'B'$ rejetée à l'infini.

11 Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale

1. Dans le triangle $O_1A_1B_1$, l'angle $\widehat{A_1O_1B_1}$ est opposé par le sommet à l'angle θ et vaut donc θ . Le point A_1 est placé sur le foyer image de l'objectif et donc $O_1A_1 = O_1F'_1$.

Le triangle $O_1A_1B_1$ est rectangle en A_1 et on a bien :

$$\tan \theta = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \frac{A_1B_1}{O_1F'_1}$$

2. La lunette est afocale de sorte que le foyer objet F_2 de l'oculaire est confondu avec le foyer image F'_1 de l'objectif :

$$O_2F'_1 = O_2F_2 = O_2A_1$$

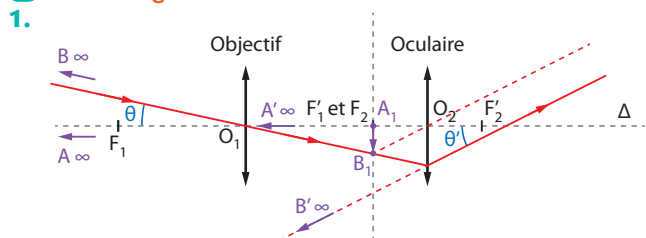
Dans le triangle $O_2A_1B_1$ rectangle en A_1 , l'angle $\widehat{A_1O_2B_1}$ est égal à θ' (angles correspondants).

$$\text{On a donc : } \tan \theta' = \frac{A_1B_1}{O_2F'_1} = \frac{A_1B_1}{O_2F_2}$$

$$3. \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{O_1F'_1}{O_2F_2} = \frac{f'_1}{f_2}; \text{ les angles sont petits, on peut confondre}$$

la mesure de $\tan \theta$ avec celle de θ . D'où : $G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{f'_1}{f_2}$.

12 Définir le grossissement



2. Le grossissement de cette lunette est $G = \frac{\theta'}{\theta}$.

13 Connaître les caractéristiques d'une lunette commerciale

1. Les indications sont le diamètre de l'objectif D et la distance focale de l'objectif f'_1 .

2. D et f'_1 sont données en mm.

14 Exploiter les caractéristiques d'une lunette commerciale (2)

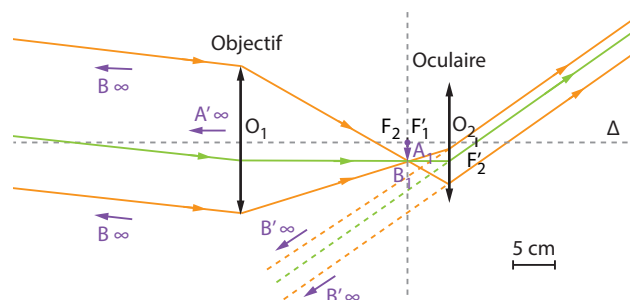
1. Le deuxième nombre indiqué correspond à la distance focale, en millimètre, de l'objectif de la lunette commerciale. On a $f' = 900$ mm.

2. Le premier nombre indiqué correspond au diamètre, en millimètre, de l'objectif de la lunette commerciale.

On a $D = 70$ mm.

15 Trajet d'un faisceau lumineux

1. La distance focale de l'objectif devrait être 4 cm sur le schéma (20 cm à taille réelle) et celle de l'oculaire 1 cm (5 cm à taille réelle).



2. Le point objet B est à l'infini.

3. a. L'image intermédiaire B_1 se trouve dans le plan perpendiculaire à l'axe optique et contenant le foyer image F'_1 , à l'intersection de ce plan avec le rayon émergent de l'objectif.

b. L'expression « plan focal » signifie que ce plan perpendiculaire à l'axe optique contient le foyer objet de l'oculaire et image de l'objectif.

4. Voir figure.

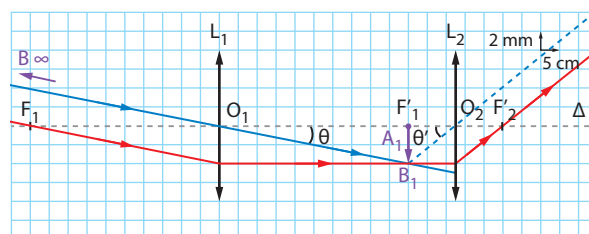
5. a. et b. L'image B' est rejetée à l'infini, dans l'espace objet de l'oculaire. Les rayons qui émergent de l'oculaire sont parallèles entre eux.

c. Voir figure.

16 Connaître les critères de réussite

Une lunette au laboratoire

1. Les rayons issus de B_∞ sont parallèles.



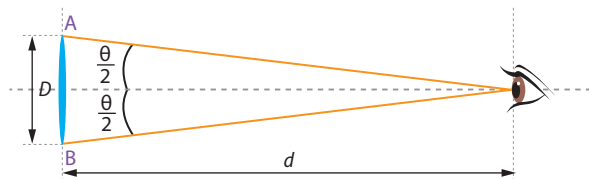
2. On a : $\tan \theta = \frac{A_1B_1}{O_1F'_1}$; on relève $A_1B_1 = 4$ mm (on compte 2 divisions et 1 division fait 2 mm).

On relève aussi : $O_1F'_1 = 50$ cm. On en déduit $\tan \theta = 8 \times 10^{-3}$.

Cette tangente étant petite, on l'assimile à l'angle.

L'angle sous lequel on voit la Lune à l'œil nu est $\theta = 8 \times 10^{-3}$ rad, soit environ $0,5^\circ$.

3. Le diamètre apparent de la Lune est l'angle sous lequel on voit la Lune à l'œil nu :



On a : $\frac{D}{2} = d \times \tan \frac{\theta}{2}$; ici $\frac{D}{2} = d \times \frac{\theta}{2}$ (angle θ petit) et donc :

$$D = d \times \theta \text{ d'où l'on tire : } d = \frac{D}{\theta}$$

Par application numérique, avec $D = 3,47 \times 10^3$ km et $\theta = 8 \times 10^{-3}$ rad, on trouve que la distance Terre-Lune est : $d = 4 \times 10^5$ km.

$$4. \tan \theta' = \frac{A_1 B_1}{O_2 A_1} = \frac{A_1 B_1}{O_2 F_1'}; \text{ ici } O_2 F_1' = 125 \text{ mm et } A_1 B_1 = 4,0 \text{ mm};$$

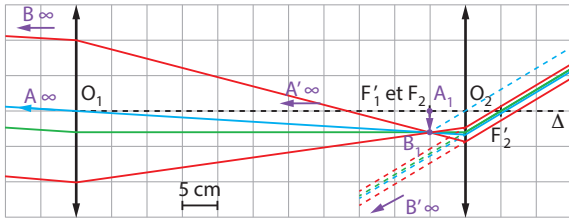
on calcule alors l'angle sous lequel on voit l'image donnée par la lunette : $\theta' = 3,2 \times 10^{-2} \text{ rad}$, soit $1,8^\circ$.

17 Construction graphique

1. La lentille de plus grande distance focale (50,0 cm) modélise l'objectif.

L'oculaire a pour distance focale 5,0 cm.

2. 3. et 4.



18 The Exposition universelle of 1900

Traduction : La lunette astronomique construite par François DELONCLE pour l'Exposition universelle de Paris, était la plus grande lunette astronomique jamais construite. Elle avait deux objectifs interchangeables de 1,25 m de diamètre, avec une distance focale de 57 m. En raison de sa taille extrêmement grande, la lunette astronomique était montée dans une position horizontale fixe. Un miroir plan mobile a été utilisé pour rediriger la lumière venant des objets astronomiques dans la lunette astronomique.

Comme la lunette astronomique n'était pas adaptée à un usage scientifique, elle a été démantelée à la fin de l'exposition, mais les deux lentilles sont encore stockées à l'Observatoire de Paris. Référence : The great Paris Exhibition telescope of 1900 ; F. Launay, *Journal for the History of Astronomy* (ISSN 0021-8286), Vol. 38, Part 4, No. 133, p. 459-475, 2007.

1. À quelle distance focale se réfère le texte ?
2. Quelle est l'image intermédiaire d'un objet situé à l'infini donné par la lunette astronomique ?
3. Quelles sont les caractéristiques de la lunette astronomique ?
4. Quelle donnée manque pour le calcul du grossissement de cette lunette astronomique ?
5. Quel est l'intérêt des données précisées dans le texte ?
6. Pourquoi la lunette astronomique est-elle placée horizontalement ?

Réponses

1. Le texte parle de la distance focale de l'objectif.
2. L'image intermédiaire d'un objet situé à l'infini donnée par cette lunette se forme dans le plan perpendiculaire à l'axe optique et contenant le foyer image de l'objectif.
3. Les caractéristiques de la lunette sont le diamètre de l'objectif (1,25 m) et la distance focale de l'objectif (57 m).
4. Il manque la distance focale de l'oculaire pour calculer le grossissement de cette lunette lorsqu'elle est en configuration afocale.
5. Plus la distance focale de l'objectif est grande, plus le grossissement est grand. Plus le diamètre de l'objectif est grand, plus l'image est lumineuse.
6. La lunette était disposée horizontalement car elle était très longue. On peut imaginer qu'elle se serait incurvée si elle avait été dirigée vers le ciel.

19 Une lunette par le calcul

1. a. La lentille L_1 modélise l'objectif.
b. On relève $f_1' = 40 \text{ cm}$ et $f_2' = 10 \text{ cm}$.
2. a. On relève $x_1' = 40 \text{ cm}$.
b. On a : $\frac{1}{x_1'} - \frac{1}{x} = \frac{1}{f_1'}$; or $x \rightarrow -\infty$ et donc $x_1' = f_1'$ soit 40 cm .

3. a. L'image $A'B'$ est rejetée à l'infini.

b. On a $O_2 A_1 = O_1 O_2 - O_1 A_1$, soit $50 \text{ cm} - 40 \text{ cm} = 10 \text{ cm}$.

D'où : $x_2 = -f_2' = -10 \text{ cm}$ et $\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} = \frac{1}{f_2'}$; on en déduit que $x_2' \rightarrow -\infty$.

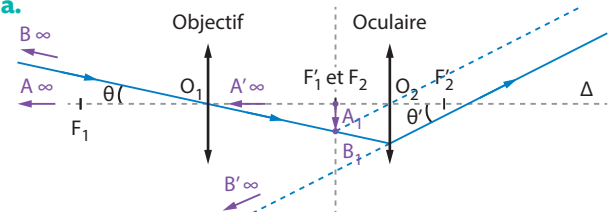
20 CORRIGÉ L'étoile Albiréo

1. 1 degré d'arc = 3 600 secondes d'arc

360° d'arc = 2π radians.

$$\theta = \frac{1^\circ \times 34 \text{ s} \times 2\pi \text{ rad}}{3\,600 \text{ s} \times 360^\circ} = 1,6 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

2. a.



La lunette est afocale de sorte que le foyer objet F_2 de l'oculaire est confondu avec le foyer image F_1' de l'objectif : $O_2 F_1' = O_2 F_2 = O_2 A_1$. Dans le triangle $O_2 A_1 B_1$ rectangle en A_1 , l'angle $A_1 O_2 B_1$ est égal à θ' (angles correspondants).

$$\text{On a donc : } \tan \theta' = \frac{A_1 B_1}{O_2 A_1} = \frac{A_1 B_1}{O_2 F_2}$$

$$\text{De même, } \tan \theta = \frac{A_1 B_1}{O_1 F_1'}$$

Si les angles sont petits, on peut confondre la tangente et l'angle.

$$\text{Donc } G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{O_1 F_1'}{O_2 F_2} = \frac{f_1'}{f_2'}$$

b. Le grossissement maximal est obtenu avec l'oculaire de plus petite distance focale.

$$\text{On a alors : } G = \frac{f_1'}{f_2'} = \frac{700 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 70.$$

3. $\theta' = G \times \theta = 70 \times 1,6 \times 10^{-4} \text{ rad}$
 $\theta' = 1,1 \times 10^{-2} \text{ rad}$.

4. Cet angle est supérieur au pouvoir séparateur de l'œil humain. Les deux étoiles sont vues séparément à travers cette lunette.

21 Résolution de problème

Victor HUGO et François ARAGO

Construire les étapes de résolution d'un problème :

1^{re} étape : S'approprier la question posée

Quelle est la relation entre angle et distance ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

1. Le doc. **A** donne les distances focales de l'objectif et de l'oculaire.
2. Le doc. **B** permet de relier les angles et les distances.

3^e étape : Dégager la problématique

Le grossissement de la lunette astronomique permet-il d'observer la Lune comme si on était seulement à deux cent vingt-cinq lieues d'elle et pas à quatre-vingt-dix mille lieues ?

4^e étape : Construire la réponse

1. Calculer le grossissement de la lunette.
2. Calculer le rapport des distances à l'aide du doc. **B**.
3. Vérifier si l'affirmation d'ARAGO est exacte.

5^e étape : Répondre

• Présenter le contexte et introduire la problématique.

On cherche à déterminer si la lunette astronomique permet d'observer la Lune comme si on était seulement à deux cent vingt-cinq lieues d'elle.

• Mettre en forme la réponse.

• Calcul du grossissement G de la lunette en configuration afocale :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{f_1'}{f_2'} = \frac{6,0 \text{ m}}{1,5 \times 10^{-2} \text{ m}} = 400.$$

Donc $\frac{\theta'}{\theta} = 400$.

D'après le doc. **B**, $\frac{\theta'}{\theta} = \frac{d}{d'}$. Or, $\frac{\theta'}{\theta} = 400$ d'où $\frac{d}{d'} = 400$ où d est la distance réelle Terre-Lune, d' est la distance à laquelle on a l'impression d'être par rapport à la Lune.

• Calculons la distance d' si $d = 90\,000$ lieues.

$$d' = \frac{d}{400} = \frac{90\,000 \text{ lieues}}{400} = 225 \text{ lieues.}$$

L'affirmation de F. ARAGO est donc exacte.

22 Pouvoir de résolution d'une lunette astronomique

1. $\beta = 1,22 \times \frac{\lambda}{d}$;

soit $\beta = 1,22 \times \frac{485 \times 10^{-9} \text{ m}}{0,100 \text{ m}} = 5,92 \times 10^{-6} \text{ rad.}$

2. Calculons l'angle α en radian sous lequel sont vues les deux étoiles d'Achird.

$\alpha = 2,8 \times 10^{-3} \text{°}$;

soit $\alpha = 2,8 \times 10^{-3} \text{°} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{360 \text{°}} = 4,9 \times 10^{-5} \text{ rad.}$

Cet angle α étant supérieur à la résolution β de la lunette, le phénomène de diffraction n'empêchera pas l'observation d'Achird.

3. Le grossissement de la lunette astronomique est par définition $G = \frac{\theta'}{\theta}$.

θ' est l'angle sous lequel l'image est vue par l'œil à travers la lunette soit, au minimum, $\theta' = \varepsilon$ et dans ce cas, $\theta = \beta$.

$$G = \frac{\varepsilon}{\beta} = \frac{3,0 \times 10^{-4} \text{ rad}}{5,92 \times 10^{-6} \text{ rad}} = 51.$$

4. a. Pour le cas où $\theta = \alpha$, on a $G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\theta'}{\alpha}$.

Donc $\theta' = G \times \alpha$; soit $\theta = 51 \times 4,9 \times 10^{-5} \text{ rad} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ rad.}$

b. L'angle sous lequel est vue l'étoile double Achird est supérieur au pouvoir séparateur de l'œil. Donc les deux étoiles d'Achird seront vues séparément.

23 Lunette astronomique et luminosité

1. La quantité de lumière captée Φ est proportionnelle à la surface S de l'objectif qui est un disque.

$$S = \pi \times \frac{D^2}{4}. \text{ Donc } \Phi_1 = k \times \pi \times \frac{D_1^2}{4} \text{ et } \Phi_2 = k \times \pi \times \frac{D_2^2}{4}.$$

Donc $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$; avec $D_1 = 100 \text{ mm}$ et $D_2 = 120 \text{ mm}$, on

obtient : $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = 1,44$.

Avec $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$, on a un écart relatif (en %) qui vaut :

$$100 \times \frac{\Delta\Phi}{\Phi_1} \text{ ou } 100 \times \frac{(1,44 - 1)}{1} \text{ soit } 44 \text{ \%}.$$

Donc on gagne bien 44 % de luminosité !

2. Un diamètre d'objectif plus grand permet de collecter davantage de lumière. Plus on collecte de lumière issue de l'astre, plus l'image observée gagne en luminosité et en contraste. On distingue alors des détails qui seraient invisibles si peu de lumière était recueillie. Plus le grossissement est important, plus on peut détailler (zoomer en quelque sorte) la structure de l'objet observé.

3. Avec un objectif de grande ouverture, l'image est plus lumineuse et donc mieux contrastée, ce qui permet de voir des détails comme certains satellites de Saturne.

4. Un télescope, à grossissement égal, est moins onéreux qu'une lunette.

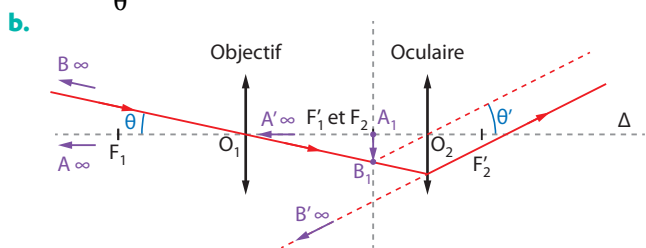
Vers le Bac

p. 402

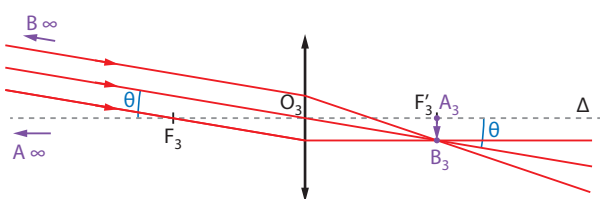
Préparation à l'écrit

24 Grossissement et œil réduit

1. a. La définition du grossissement d'une lunette astronomique est : $G = \frac{\theta'}{\theta}$.



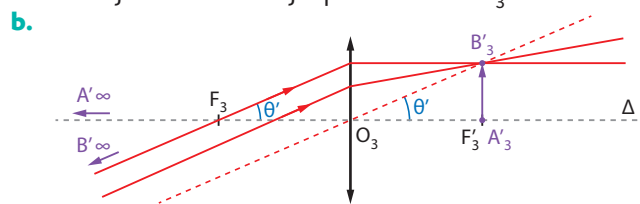
2. a. et b.



c. On a : $\tan \theta = \frac{A_3 B_3}{O_3 A_3}$ mais A_3 est confondu avec F_3 car l'image est dans le plan contenant le foyer image F_3 et perpendiculaire à l'axe optique.

Donc $\tan \theta = \frac{A_3 B_3}{f_3}$; on obtient : $\theta = 3,7 \text{°}$ ou $0,065 \text{ rad}$; c'est un petit angle de sorte que l'on peut confondre $\tan \theta$ avec θ (rad).

3. a. $A'B'$ joue le rôle d'objet pour la lentille L_3 .



c. On a maintenant $\tan \theta' = \frac{A_3' B_3'}{f_3}$ et l'on calcule : $\theta' = 36,7 \text{°}$ ou $0,640 \text{ rad.}$

4. On en déduit $G = \frac{0,640 \text{ rad}}{0,065 \text{ rad}}$ soit $G = 9,8$.

5. a. Pour cette lunette afocale :

On a : $\frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{O_1 F_1'}{O_2 F_2'} = \frac{f_1'}{f_2'}$; si les angles sont petits, $\tan \theta = \theta$.

D'où : $G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{f_1'}{f_2'}$.

$$G = \frac{f_1'}{f_2'} = \frac{50,0 \text{ cm}}{5,0 \text{ cm}} = 10.$$

$$b. u(G) = G \times \sqrt{\left(\frac{u(f'_1)}{f'_1}\right)^2 + \left(\frac{u(f'_2)}{f'_2}\right)^2}$$

$$\text{soit } u(G) = \frac{0,640 \text{ rad}}{0,065 \text{ rad}} \times \sqrt{\left(\frac{0,1 \text{ cm}}{50,0 \text{ cm}}\right)^2 + \left(\frac{0,1 \text{ cm}}{5,0 \text{ cm}}\right)^2}$$

$$u(G) = 0,2.$$

On a $G = 9,8 \pm 0,2$.

Remarque : l'application précédente permet de se rendre compte que f'_1 est une source d'erreur négligeable devant f'_2 .

c. Le grossissement G est compris entre 9,6 et 10. Cela confirme bien la valeur trouvée à la question 5. a.

25 Et la lumière fut

Partie I

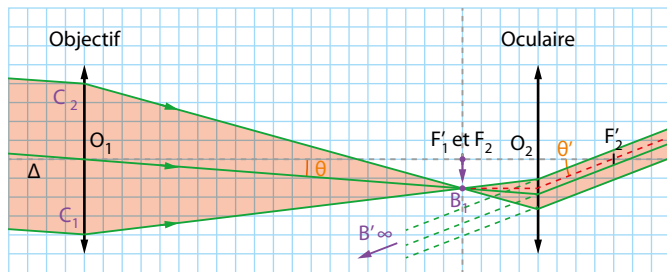
1. et 2. a. Voir la figure ci-dessous, sans souci d'échelle.

b. Le point B_1 est situé dans le plan perpendiculaire à l'axe optique et contenant le foyer image F'_1 de l'objectif.

c. Voir la figure ci-dessous

3. a. L'image définitive B' est rejetée à l'infini.

b. Voir la figure ci-dessous.

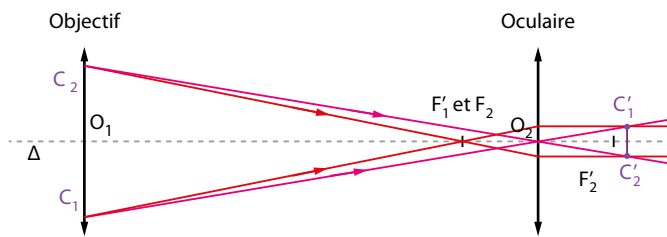


Partie II

Remarque : Pour déterminer graphiquement le cercle oculaire, on trace le rayon issu de C_1 et passant par F_2 ainsi que le rayon issu de C_1 et passant par O_2 .

Le point C'_1 image de C_1 est à l'intersection des deux rayons émergeant de la lentille.

On procède de même pour le point C_2 . La taille du cercle oculaire est $C'_1 C'_2$.



• Calculons la position du cercle oculaire :

Nous recherchons en premier, par rapport à O_2 , l'abscisse x'_{C_1} de l'image C'_1 en fonction de l'abscisse x_{C_1} du point C_1 .

$$\frac{1}{x'_{C_1}} - \frac{1}{x_{C_1}} = \frac{1}{f'_2} \text{ soit } \frac{1}{x'_{C_1}} = \frac{1}{x_{C_1}} + \frac{1}{f'_2}.$$

Le descriptif de la lunette indique 70/800. On a donc $f'_1 = 800 \text{ mm}$. De plus, $f'_2 = 20,0 \text{ mm}$.

Donc $|x_{C_1}| = 800 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = 820 \text{ mm}$. Attention, x_{C_1} est négatif.

On a alors : $\frac{1}{x'_{C_1}} = \frac{1}{-820 \text{ mm}} + \frac{1}{20,0 \text{ mm}}$; soit $x'_{C_1} = 20,5 \text{ mm}$.

Le grandissement de l'oculaire est : $\gamma = \frac{y'_{C_1}}{y_{C_1}} = \frac{x'_{C_1}}{x_{C_1}}$;

$$\text{donc : } y'_{C_1} = \frac{x'_{C_1}}{x_{C_1}} \times y_{C_1}.$$

Le descriptif de la lunette indique 70/800. Donc le diamètre de l'objectif est égal à 70 mm. On en déduit $O_1 C_1 = 35 \text{ mm}$ et donc $y_{C_1} = -35 \text{ mm}$.

$$y'_{C_1} = \frac{20,5 \text{ mm}}{-820 \text{ mm}} \times (-35 \text{ mm}). \text{ On obtient } y'_{C_1} = 0,90 \text{ mm}.$$

Par symétrie, on détermine la taille du cercle oculaire :

$$2 \times 0,90 \text{ mm} = 1,8 \text{ mm}.$$

La taille du cercle oculaire est bien inférieure au diamètre de la pupille de l'œil qui est environ 7 mm d'après l'image de l'exercice. La condition est bien vérifiée.

Préparation à l'ECE

1. La lentille de plus grande distance focale, ici L_1 ($f'_1 = 50,0 \text{ cm}$), constituera l'objectif.

2. Par construction d'une lunette astronomique afocale, $O_1 O_2 = f'_1 + f'_2$.

$$O_1 O_2 = 62,5 \text{ cm}.$$

3. Il faut rechercher avec un écran la position de l'image d'un objet lointain formée par l'objectif. Cette image est à rechercher entre l'objectif et l'oculaire.

4. Pour une lunette astronomique afocale,

$$G = \frac{f'_1}{f'_2} = \frac{50,0 \text{ cm}}{12,5 \text{ cm}} = 4,00.$$

Vers l'oral

Je m'exprime à l'oral sur

La lunette astronomique

• De quoi est composée une lunette astronomique ?

Une lunette astronomique comporte un objectif situé du côté de l'objet observé et un oculaire situé du côté de l'œil.

• Quelle est l'expression du grossissement d'une lunette astronomique ?

Le grossissement G d'une lunette est défini par :

$$G \text{ sans unité} \rightarrow G = \frac{\theta'}{\theta} \quad \theta' \text{ et } \theta \text{ en rad}$$

θ est l'angle sous lequel l'objet est vu à l'œil nu.

θ' est l'angle sous lequel l'image de l'objet est vue à travers la lunette astronomique.

• Qu'est-ce qu'une lunette afocale ?

Une lunette est qualifiée d'afocale lorsque le foyer image de son objectif est confondu avec le foyer objet de son oculaire.

20

La lumière : un flux de photons

Programme officiel

Ondes et signaux

| 2. Former des images, décrire la lumière par un flux de photons | |
|--|---|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| B) Décrire la lumière par un flux de photons | |
| <p>Le photon : énergie, vitesse, masse. Effet photoélectrique. Travail d'extraction.</p> <p>Absorption et émission de photons. Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.</p> | <p>Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique. Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière. Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence. Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.</p> <p>Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.). <i>Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.</i></p> |

Liens avec le programme officiel de seconde et de première (enseignement de spécialité)

| Vocabulaire associé | Connaissances et savoir-faire | Modèles / Relations |
|---|---|---|
| SECONDE | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Vitesse de propagation de la lumière dans le vide ou dans l'air. Longueur d'onde dans le vide ou dans l'air. | <ul style="list-style-type: none"> Citer la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide ou dans l'air et la comparer à d'autres valeurs de vitesses couramment rencontrées. Caractériser un rayonnement monochromatique par sa longueur d'onde dans le vide ou dans l'air. | $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. <ul style="list-style-type: none"> Spectre de la lumière, association d'une radiation à une longueur d'onde. |
| PREMIÈRE | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Domaines des ondes électromagnétiques. Relation entre longueur d'onde, célérité de la lumière et fréquence. | <ul style="list-style-type: none"> Utiliser une échelle de fréquences ou de longueurs d'onde pour identifier un domaine spectral. Citer l'ordre de grandeur des fréquences ou des longueurs d'onde des ondes électromagnétiques utilisées dans divers domaines d'application (imagerie médicale, optique visible, signaux wifi, micro-ondes, etc.). | |
| <ul style="list-style-type: none"> Le photon. Énergie d'un photon. Description qualitative de l'interaction lumière-matière : absorption et émission. | <ul style="list-style-type: none"> Utiliser l'expression donnant l'énergie d'un photon. Exploiter un diagramme de niveaux d'énergie en utilisant les relations $\lambda = \frac{c}{\nu}$ et $\Delta E = h \times \nu$. | <p>Modèle corpusculaire de la lumière : le photon.</p> |
| Puissance et énergie. | | |
| Rendement d'un convertisseur | <ul style="list-style-type: none"> Définir le rendement d'un convertisseur. Évaluer le rendement d'un dispositif. | <p>sans unité $\rightarrow \eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{exploitable}}}{\mathcal{P}_{\text{entrée}}}$ (avec \mathcal{P} en W)</p> |

La valeur de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide ou dans l'air doit être connue par les élèves depuis la classe de seconde, aussi elle ne sera indiquée ni dans les activités, ni dans les exercices.

Vu en première

La lumière

p. 406

Réactiver ses connaissances

Capsule vidéo : Interpréter et prévoir des spectres

- La fréquence de cette radiation est donnée par $\nu = \frac{c}{\lambda}$ donc $\nu = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{505 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5,94 \times 10^{14} \text{ Hz}$.
- L'énergie transportée par chacun des photons de cette radiation est :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

Diagramme illustrant la relation $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$ avec des flèches indiquant les unités de chaque terme :

- h en $\text{J} \cdot \text{s}$ (pointe vers $h \times \nu$)
- ν en Hz (pointe vers ν)
- c en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (pointe vers $h \times c$)
- λ en m (pointe vers λ)
- $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ en J (pointe vers $\mathcal{E}_{\text{photon}}$)

$$\text{Donc } \mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{505 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 3,94 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

3. Le spectre est un spectre d'émission. Lors de l'émission d'un photon l'énergie de l'atome diminue. La transition mise en jeu est donc la transition (a).

4. Le spectre d'absorption de l'hélium sera constitué de raies noires sur fond coloré. Les raies noires correspondent à des radiations de même longueur d'onde que les radiations associées aux raies colorées du spectre d'émission.

Flash test

1. B ; 2. B et C ; 3. B ; 4. A

Activité 1

documentaire L'effet photoélectrique

p. 407

Capacités exigibles

- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique.
- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.
- Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence.

Analyse des documents

1 Le rayonnement lumineux provoque le rapprochement des feuilles conductrices de l'électroscope. Ce rayonnement provoque donc une diminution de la valeur absolue de la charge électrique portée par les feuilles. Comme l'électroscope et la plaque de zinc sont initialement chargés négativement, ils portent un excès d'électrons. Le rayonnement fait donc diminuer le nombre d'électrons excédentaires.

2 L'énergie du photon incident est en partie utilisée pour arracher l'électron. L'excès se retrouve sous forme d'énergie cinétique de l'électron arraché. On a donc $\mathcal{E}_{\text{photon}} = \mathcal{E}_{\text{arrachement}} + \mathcal{E}_{\text{cinétique}}$. En notant $W_{\text{extraction}}$ l'énergie nécessaire pour arracher un électron, on a $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{\text{cinétique}}$.

3 La longueur d'onde d'une radiation UV est plus petite que celle d'une radiation visible. Un photon d'une radiation UV transporte donc davantage d'énergie qu'un photon d'une radiation visible. Cette plus grande énergie permet aux radiations UV d'arracher des électrons aux métaux contrairement aux radiations visibles.

4 $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{\text{cinétique}}$ donc $\mathcal{E}_{\text{cinétique}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$ soit $\frac{1}{2} m_e \times v^2 = h \times \frac{c}{\lambda} - W_{\text{extraction}}$.

$$\text{Il vient donc } v = \sqrt{\frac{2 \left(h \times \frac{c}{\lambda} - W_{\text{extraction}} \right)}{m_e}} \quad \text{soit } v = \sqrt{\frac{2 \left(6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{300 \times 10^{-9} \text{ m}} - 3,63 \text{ eV} \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1} \right)}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$\text{soit } v = 4,25 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Remarque : cette valeur de vitesse est en fait la valeur maximale de la vitesse des électrons. C'est la valeur de la vitesse lors de l'extraction d'électrons proches de la surface du métal. Lorsque des électrons éloignés de la surface sont arrachés, l'énergie pour les extraire est supérieure à $W_{\text{extraction}}$. L'énergie cinétique et la vitesse de ces électrons extraits sont alors plus petites que celles calculées ici.

Un pas vers le cours

5 Lors de l'effet photoélectrique, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à un métal.

Activité 2

expérimentale Rendement d'une cellule photovoltaïque p. 408

Capacités exigibles

- Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.
- Utiliser un multimètre, adapter le calibre si nécessaire.
- Réaliser un montage électrique conformément à un schéma électrique normalisé.
- Utiliser un luxmètre ou une photorésistance.
- Utiliser une cellule photovoltaïque.

Matériel :

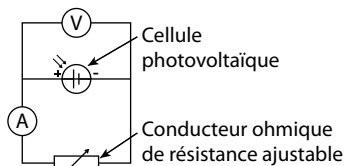
- Cellule photovoltaïque.
- Conducteur ohmique de résistance ajustable.
- Voltmètre.
- Ampèremètre.
- Fils de connexion.
- Lampe pour laquelle le facteur de conversion des lux en $W \cdot m^{-2}$ est connu*.
- Luxmètre.

* Le facteur de conversion peut être déterminé avant ou pendant la séance avec un pyranomètre qui donne la puissance surfacique en $W \cdot m^{-2}$.

Un pyranomètre suffit par classe. On trouve actuellement des pyranomètres pour environ 300 €.

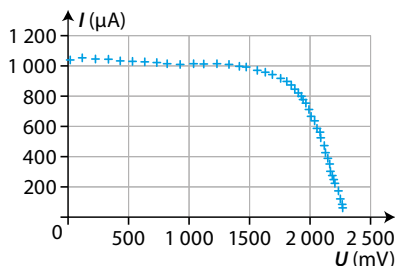
Pratique expérimentale

1 Pour représenter la caractéristique intensité – tension $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque, il faut réaliser un montage permettant de faire varier I et U pour un éclairement connu.



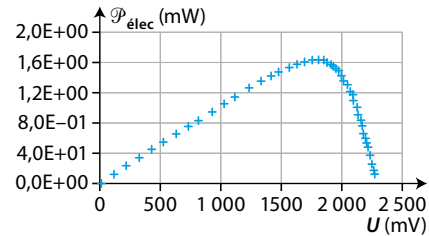
La cellule photovoltaïque sera éclairée par une lampe. Un luxmètre placé à la même distance de la lampe que la cellule, et orienté comme elle, permet de mesurer l'éclairement de la lampe.

Exemple de résultats obtenus avec une cellule de $4,6 \text{ cm} \times 4,6 \text{ cm}$ et une puissance surfacique égale à $65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:



2 La puissance (en watt) est obtenue en multipliant la tension (en volt) par l'intensité (en ampère).

Exemple de résultats obtenus avec une cellule de $4,6 \text{ cm} \times 4,6 \text{ cm}$ et une puissance surfacique égale à $65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:



3 Le rendement est donné par $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$.

La puissance électrique maximale obtenue est $\mathcal{P}_{\text{elec}} = 1,64 \text{ mW}$. Les mesures permettant d'obtenir les courbes précédentes ont été réalisées avec une cellule de surface :

$$S = 4,6 \text{ cm} \times 4,6 \text{ cm} = 21 \text{ cm}^2 \text{ soit } 2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

La lampe utilisée pour ces mesures, placée à 25 cm de la cellule, fournit une puissance surfacique de $65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (mesurée avec un pyranomètre).

La puissance lumineuse reçue est donc :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,4 \times 10^{-1} \text{ W} = 1,4 \times 10^2 \text{ mW}.$$

Le rendement maximal est donc :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{1,64 \text{ mW}}{1,4 \times 10^2 \text{ mW}} = 0,012 \text{ soit } 1,2 \%$$

Remarque : l'éclairement mesuré simultanément avec un luxmètre était 1 945 lux. Le facteur de conversion correspondant aux conditions de cette mesure est donc $\frac{65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1 945 \text{ lux}} = 0,033 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / \text{lux}$.

Ce facteur de conversion peut fortement varier d'une lampe à l'autre. Pour que les mesures aient du sens, sa détermination à l'aide d'un pyranomètre est indispensable.

4 D'après le doc. A, la température a une influence importante sur le rendement des cellules photovoltaïques : pour un éclairement donné, plus la température est grande et plus le rendement est faible.

Le lac permet de limiter l'élévation de la température lorsque les cellules sont fortement éclairées par le Soleil. Cela augmente le rendement de conversion.

Un pas vers le cours

5 Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport de la puissance (ou l'énergie) électrique fournie à la puissance (ou

$$\text{l'énergie) lumineuse reçue : } \eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}.$$

Capsule vidéo de cours : Bilan énergétique de l'effet photoélectrique

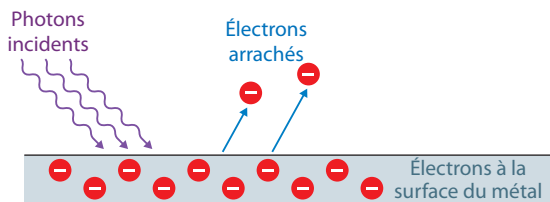
QCM

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

p. 413

3 Connaître l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est le phénomène d'éjection d'électrons d'un métal sous l'effet de radiations lumineuses.



4 Décrire l'effet photoélectrique

1.

| Métal | Fréquence (Hz) | Longueur d'onde (nm) |
|--------------|-----------------------|----------------------|
| Plomb Pb | $1,02 \times 10^{15}$ | 294 |
| Potassium K | $5,52 \times 10^{14}$ | 543 |
| Magnésium Mg | $8,82 \times 10^{14}$ | 340 |

2. Pour que l'effet photoélectrique se produise quel que soit le métal, il faut utiliser des radiations de longueur d'onde suffisamment petite, donc des UV ($\lambda \leq 294$ nm).

5 Interpréter l'effet photoélectrique

- Des électrons sont arrachés au zinc métallique, ce qui entraîne un déficit de charges négatives et donc un excès de charges positives.
- L'énergie d'un photon est donnée par :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ (en J)} = \frac{h \text{ (en J} \cdot \text{s)} \times c \text{ (en m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\lambda \text{ (en m)}}$$

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.

6 Expliquer l'effet photoélectrique

- Ces quanta de lumière sont nommés photons.
- Ces quanta permettent d'expliquer l'effet photoélectrique car c'est l'interaction d'un photon avec la matière qui entraîne l'extraction d'un électron. L'énergie du photon doit être suffisante, l'extraction est alors instantanée. De plus, l'énergie de l'électron extrait augmente quand la fréquence de la radiation augmente, ce qui est conforme à la description des ondes électromagnétiques par des quanta, car l'énergie d'un photon augmente quand la fréquence augmente.

Avec le modèle ondulatoire, on devrait observer un arrachage pour toute intensité lumineuse, il suffirait d'attendre assez longtemps pour que suffisamment d'énergie soit transférée quelle que soit la radiation utilisée, ce qui n'est pas le cas. De plus, avec le modèle ondulatoire, l'énergie cinétique des électrons extraits ne devrait pas dépendre de la fréquence de la radiation lumineuse, or elle en dépend.

7 Réaliser un bilan d'énergie

- $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$
- $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$
 $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = (5,03 \text{ eV} - 4,67 \text{ eV}) \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1}$
 d'où $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 5,76 \times 10^{-20} \text{ J}$.

8 Calculer l'énergie d'un photon

- $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$
- $\mathcal{E}_{\text{photon}} = 6,93 \times 10^{-19} \text{ J} + \frac{1}{2} \times 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (7,60 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 9,56 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$3. \lambda \text{ (en m)} = \frac{h \text{ (en J} \cdot \text{s)} \times c \text{ (en m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ (en J)}}$$

$$\text{D'où } \lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{9,56 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

$\lambda = 2,08 \times 10^{-7} \text{ m} = 208 \text{ nm}$
 Cela correspond à une radiation UV.

9 Calculer des rendements

1. La puissance électrique disponible diminue lorsque l'éclairement E diminue.

$$2. \eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}} \text{ (en W)}}{\mathcal{P}_{\text{lum}} \text{ (en W)}}$$

avec $\mathcal{P}_{\text{lum}} \text{ (en W)} = E \text{ (en W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \times S \text{ (en m}^2\text{)}$.

3. La surface du panneau est $S = 1,1 \text{ m}^2$.

D'après le graphique, on a donc :

| \mathcal{P}_{lum} (W) | $\mathcal{P}_{\text{elec}}$ (W) |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 100 | 100 |
| 660 | 60 |
| 220 | 20 |

Dans tous ces cas, $\eta_{\text{max}} = 0,09$ soit 9 %. Ce rendement ne dépend pas de l'éclairement.

10 Exploiter un rendement

1. L'augmentation du rendement des cellules permet une augmentation de la puissance électrique disponible.

$$2. \mathcal{P}_{\text{elec}} = \eta \times \mathcal{P}_{\text{lum}}$$

$$\mathcal{P}_{\text{elec}} = \frac{22,3}{100} \times 1,13 \times 10^1 \text{ W} = 2,52 \text{ W}$$

11 Citer des applications de l'interaction photon-matière

- Dans le capteur de lumière d'un appareil photographique numérique, des photons sont absorbés ; leur énergie permet d'arracher des électrons au semi-conducteur constituant le capteur.
- Dans une diode électroluminescente, le courant électrique provoque l'émission de photons.

12 Reconnaître l'absorption ou l'émission de photons

- Cellule photoélectrique : absorption de photons.
- Chargeur photovoltaïque : absorption de photons.
- DEL infrarouge de télécommande : émission de photons.

13 Connaître les critères de réussite

Conservation de l'énergie

1.a. On relève graphiquement la fréquence seuil à partir de laquelle un électron est arraché : $\nu_s \approx 8,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$

$$\text{On en déduit la longueur d'onde seuil : } \lambda_s \text{ (en m)} = \frac{c \text{ (en m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\nu_s \text{ (en Hz)}}$$

$$\text{Donc } \lambda_s = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{8,8 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 3,4 \times 10^{-7} \text{ m}$$

b. λ_s est la longueur d'onde qui correspond à l'énergie minimale permettant d'arracher un électron à la surface du zinc. C'est donc

la longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il ne sera plus possible d'arracher un électron à ce métal.

2. On a : $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ (en J) = h (en J·s) \times ν (en Hz = s⁻¹)

De plus, $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$ et $W_{\text{extraction}} = h \times \nu_s$

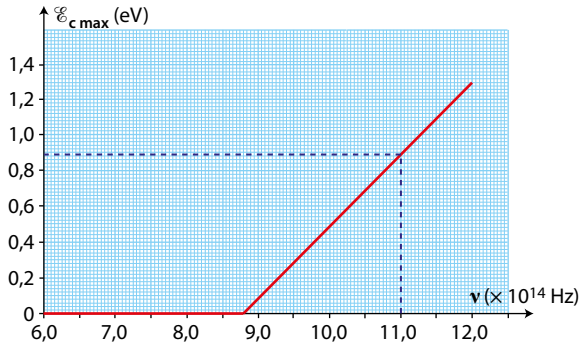
Donc $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - h \times \nu_s = h \times \nu - h \times \nu_s = h \times (\nu - \nu_s)$

$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times (1,1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} - 8,8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1})$

$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 1,5 \times 10^{-19} \text{ J}$

soit $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 0,91 \text{ eV}$.

3. Graphiquement, on recherche l'énergie correspondant à une fréquence égale à $1,1 \times 10^{15} \text{ Hz}$.



On relève : $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 0,9 \text{ eV}$.

Cette valeur est en accord avec la précédente.

14 À chacun son rythme

Une histoire de rendement

1. Les différentes puissances mises en jeu s'écrivent :

$\mathcal{P}_{\text{elec}} = 305 \text{ W}$;

\mathcal{P}_{lum} (en W) = E (en W·m⁻²) \times S (en m²) où S est la surface totale de toutes les cellules :

$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times (160 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \times 60 = 1,54 \times 10^3 \text{ W}$.

2. $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{elec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$.

3. $\eta_{\text{max}} = \frac{305 \text{ W}}{1,54 \times 10^3 \text{ W}} = 0,200$ soit 20,0 %.

15 Énergie cinétique des électrons

1.a. D'après la formule indiquée dans l'énoncé :

$\mathcal{E}_{c \text{ max}}$ (en J) = e (en C) \times U_a (en V)

$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2,80 \text{ V} = 4,48 \times 10^{-19} \text{ J}$.

b. Par définition, $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \frac{1}{2} \times m_e \times v_{\text{max}}^2$.

Il vient donc $v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times \mathcal{E}_{c \text{ max}}}{m_e}}$

soit $v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times 4,48 \times 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 9,92 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. Le bilan énergétique de l'effet photoélectrique s'écrit :

$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$

3. Il découle de ce bilan : $W_{\text{extraction}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - \mathcal{E}_{c \text{ max}}$

L'énergie d'un photon est :

$\mathcal{E}_{\text{photon}}$ (en J) = $\frac{h \text{ (en J} \cdot \text{s)} \times c \text{ (en m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\lambda \text{ (en m)}}$.

L'énergie cinétique maximale est $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = e \times U_a$.

On en tire : $W_{\text{extraction}} = \frac{h \times c}{\lambda} - e \times U_a$.

D'où :

$W_{\text{extraction}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{171 \times 10^{-9} \text{ m}}$

$- 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2,80 \text{ V}$

$W_{\text{extraction}} = 7,15 \times 10^{-19} \text{ J}$.

4. L'énergie d'un photon associée à une radiation de 350 nm est :

$\mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{350 \times 10^{-9} \text{ m}}$

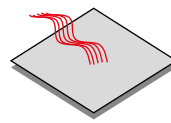
$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 5,68 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Cette énergie est inférieure au travail d'extraction : l'effet photoélectrique ne peut donc pas se produire pour ce métal avec cette radiation.

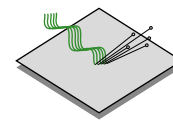
16 Photoelectric effect

Traduction : En 1914, le physicien américain Robert MILLIKAN a découvert que la lumière ayant des fréquences inférieures à une certaine valeur de coupure, appelée fréquence seuil, n'éjectait pas de photoélectrons de la surface du métal, quelle que soit la luminosité de la source. Ces résultats étaient tout à fait inattendus. Étant donné qu'il est possible d'extraire des électrons avec de la lumière et que l'énergie d'un faisceau de lumière est liée à son intensité, la physique classique prédirait qu'un faisceau de lumière plus intense éjecterait des électrons de plus grande énergie qu'un faisceau moins intense, quelle que soit la fréquence.

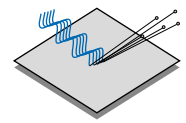
Mais ce n'était pas le cas.



La lumière rouge n'éjecte pas de photoélectrons (même si elle est très intense).



La lumière verte éjecte des photoélectrons (même si elle est très faible).



La lumière bleue éjecte des photoélectrons avec plus d'énergie que la lumière verte (même si elle est très faible).

En fait, peut-être que ces résultats ne sont pas si typiques et qu'ils changeraient avec différents métaux. La plupart des métaux ont des fréquences seuils qui sont dans le spectre ultraviolet et seulement quelques-unes sont assez basses pour atteindre le spectre visible et être vertes ou bleues comme dans l'exemple ci-dessus.

1. Que représente la fréquence seuil ?
2. Expliquer en quoi les résultats étaient surprenants à l'époque.
3. Les schémas seraient-ils identiques quel que soit le métal ?

Réponses :

1. La fréquence seuil est la fréquence minimale de la radiation qui permet d'observer l'effet photoélectrique.

2. L'effet de seuil n'est pas le même suivant la nature du métal. Soit l'extraction a lieu, soit elle est impossible, indépendamment de la durée d'exposition.

Or avec le modèle ondulatoire de la lumière, une plus grande durée d'exposition devrait apporter suffisamment d'énergie pour réaliser l'extraction. Le modèle ondulatoire ne permet donc pas d'expliquer l'effet photoélectrique.

3. La situation schématisée ici est celle d'un métal pour lequel l'effet photoélectrique se produit avec des radiations visibles de longueur d'onde inférieure ou égale à celle correspondant au vert (donc avec un seuil voisin de 550 nm) ; pour d'autres métaux, ce seuil est dans le violet ou dans l'ultraviolet. Les schémas ne seraient donc pas les mêmes.

17 Comparaison de l'effet photoélectrique

1. Les longueurs d'onde des radiations visibles sont comprises entre 400 nm et 800 nm.

Les fréquences correspondantes sont données par :

$\nu \text{ (en Hz)} = \frac{c \text{ (en m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\lambda \text{ (en m)}}$.

On en déduit les fréquences correspondantes :

| λ (en m) | ν (en Hz) |
|------------------|-----------------------|
| 400 | $7,50 \times 10^{14}$ |
| 800 | $3,75 \times 10^{14}$ |

Par lecture graphique, on constate que le potassium est le seul des trois métaux cités pour lequel la fréquence seuil (environ $5,5 \times 10^{14}$ Hz) se situe entre les fréquences extrêmes des radiations visibles. Les deux autres métaux ont des fréquences seuils plus grandes.

Le potassium est donc le seul de ces trois métaux pour lequel l'effet photoélectrique est possible en utilisant des radiations lumineuses visibles.

2.a. Le bilan d'énergie s'écrit : $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$

donc $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$

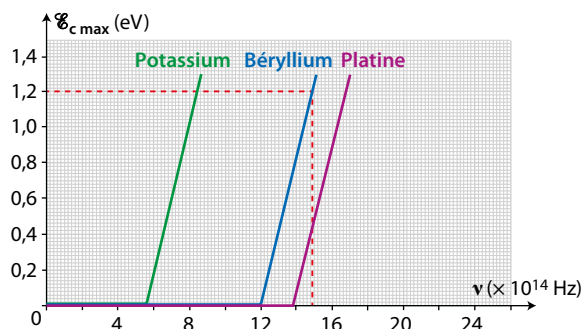
soit $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = h \times \nu - W_{\text{extraction}}$

b. L'équation précédente montre que $\mathcal{E}_{c \text{ max}}$ est une fonction affine de la fréquence ν .

Le coefficient directeur est égal à la constante de Planck h . C'est le même pour toutes les courbes.

L'ordonnée à l'origine est l'opposée du travail d'extraction, elle dépend du métal.

c. Pour déterminer le coefficient directeur on prend deux points sur l'une des courbes.



Par exemple, sur la courbe du béryllium on a :

$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 0$ eV pour $\nu = 12,0 \times 10^{14}$ Hz

et $\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 1,2$ eV pour $\nu = 14,9 \times 10^{14}$ Hz.

On en déduit :

$$h = \frac{1,2 \text{ eV} - 0 \text{ eV}}{14,9 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} - 12,0 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4,1 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

Il faut multiplier par $1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot \text{eV}^{-1}$ pour convertir en $\text{J} \cdot \text{s}$.

Il vient alors $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Remarque : on retrouve un résultat cohérent avec la valeur admise : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Pour déterminer le travail d'extraction on relève les fréquences seuils. Le travail d'extraction est égal à l'énergie d'un photon de fréquence égale à la fréquence seuil : $W_{\text{extraction}} = h \times \nu_s$.

| Métal | ν_s | $W_{\text{extraction}}$ |
|-----------|--------------------------|--------------------------|
| Potassium | $5,5 \times 10^{14}$ Hz | $3,6 \times 10^{-19}$ J |
| Béryllium | $12,0 \times 10^{14}$ Hz | $7,96 \times 10^{-19}$ J |
| Platine | $13,8 \times 10^{14}$ Hz | $9,15 \times 10^{-19}$ J |

18 Résolution de problème

Une maison autonome ?

Introduction

On cherche à savoir si l'installation de 10 panneaux photovoltaïques permet de couvrir les besoins d'une habitation.

Solution détaillée :

Pour connaître l'énergie électrique produite, il faut évaluer le rendement des panneaux et connaître l'énergie lumineuse reçue.

Étape 1 : Évaluation du rendement des panneaux

L'énergie lumineuse par unité de surface cumulée sur une année à Bordeaux est donnée dans le doc. **A**. Elle est comprise entre $1\,450 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ et $1\,600 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$. On peut prendre une moyenne de $1\,525 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$.

La durée d'ensoleillement est 2 050 h sur l'année.

L'ensoleillement moyen est donc :

$$E = \frac{1\,525 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}}{2\,050 \text{ h}} = 0,743\,9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Pour déterminer le rendement, on choisit dans les données du doc. **B** la courbe moyenne la plus proche. C'est celle pour laquelle $E = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque utilisé sont données dans le doc. **B**. La surface du panneau est égale à $1,46 \text{ m}^2$. Pour une puissance lumineuse surfacique égale à $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, la puissance lumineuse reçue est donc :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 1,46 \text{ m}^2 = 1,17 \times 10^3 \text{ W}.$$

Il s'agit maintenant de déterminer la puissance électrique maximale à partir du schéma **B**. La puissance électrique est donnée par la relation $\mathcal{P}_{\text{élec}} = U \times I$. Donc la puissance augmente quand U augmente à I constant ou quand I augmente à U constant.

On remarque sur le graphique que la puissance augmente jusqu'à ce que la tension dépasse 35 V environ. En effet, pour des tensions inférieures à 35 V, l'intensité est constante mais ensuite pour des tensions supérieures à 35 V, l'intensité diminue fortement.

La puissance électrique maximale est obtenue pour une tension proche de 35 V. L'intensité correspondante est proche de 6 A.

On a alors $\mathcal{P}_{\text{élec}} = 35 \text{ V} \times 6 \text{ A} = 2 \times 10^2 \text{ W}$.

Le rendement du panneau est $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$;

$$\text{donc } \eta = \frac{2 \times 10^2 \text{ W}}{1,17 \times 10^3 \text{ W}} = 0,17, \text{ soit environ } 17 \text{ \%}.$$

Étape 2 : Évaluation de la production

L'énergie lumineuse reçue par un panneau est égale à l'énergie lumineuse surfacique reçue multipliée par la surface du panneau : $\mathcal{E}_{\text{lum}} = 1\,525 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \times 1,46 \text{ m}^2 = 2,23 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

Avec un rendement de 17 %, l'énergie électrique produite par un panneau est :

$$\mathcal{E}_{\text{élec-1 panneau}} = 2,23 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 0,17 = 3,8 \times 10^2 \text{ kW} \cdot \text{h}.$$

Avec 10 panneaux cette énergie produite sera 10 fois plus grande : $\mathcal{E}_{\text{élec}} = 3,8 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

Étape 3 : Confrontation avec les besoins de l'habitation

Les caractéristiques du logement sont données dans le doc. **D**. Ce logement est de classe A. La consommation totale sur une année est égale à l'énergie surfacique évaluée dans le diagnostic énergétique multipliée par la surface du logement, soit ici :

$$\mathcal{E} = 25 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \times 120 \text{ m}^2 = 3,0 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}.$$

L'énergie électrique produite ($3,8 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$) est donc supérieure aux besoins ($3,0 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$).

Conclusion

L'installation de 10 panneaux fournira une énergie électrique supérieure aux besoins, elle semble donc suffisante. Cependant, dans ces calculs, on s'est basé sur une valeur approximative de l'énergie surfacique annuelle et on n'a pas tenu compte des pertes par effet Joule dans les systèmes électriques de fonctionnement des panneaux (régulation de la tension fournie...). Une marge de sécurité est de plus nécessaire, il est possible qu'elle soit atteinte avec les 10 panneaux car la production calculée est supérieure d'environ 25 % aux besoins prévus. Il faudra cependant d'autres dispositifs d'approvisionnement car la production comme la consommation ne sont pas constantes sur toute une année.

19 Python

Programmons l'effet photoélectrique

Ressources pour le professeur à télécharger :
Fichier Python

1. La ligne du programme qui traduit la conservation d'énergie lors de l'effet photoélectrique est la ligne :

```
Ec=Ephoton-efet_photo[metal]
```

2.a. Pour une longueur d'onde de radiation incidente $\lambda = 530 \text{ nm}$, l'effet photoélectrique est observé avec le potassium :

$$W_{\text{extraction}} = 2,3 \text{ eV} = 3,7 \times 10^{-19} \text{ J},$$

$$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 4,6 \times 10^{-2} \text{ eV} = 7,3 \times 10^{-21} \text{ J},$$

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

b. On a maintenant :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1,30 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}} = 2,31 \times 10^{-7} \text{ m} = 231 \text{ nm}.$$

Le platine et l'or sont les éléments cités qui ne peuvent pas conduire à un effet photoélectrique dans ces conditions.

Remarque : pour le platine $W_{\text{extraction}} = 5,8 \text{ eV}$.

Et on a maintenant :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 1,30 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 8,62 \times 10^{-19} \text{ J} \text{ ou } 5,39 \text{ eV}.$$

Donc $\mathcal{E}_{\text{photon}} < W_{\text{extraction}}$, cela explique pourquoi l'extraction n'est pas possible avec le platine.

Pour l'or $W_{\text{extraction}} = 5,4 \text{ eV}$ et $\mathcal{E}_{\text{photon}} = 5,39 \text{ eV}$.

Donc $\mathcal{E}_{\text{photon}} < W_{\text{extraction}}$, l'extraction n'est pas possible avec l'or.

3. Pour le métal calcium et une longueur d'onde $\lambda = 280 \text{ nm}$, le programme affiche notamment :

$$W_{\text{extraction}} = 2,9 \text{ eV} = 4,6 \times 10^{-19} \text{ J},$$

$$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = 1,5 \text{ eV} = 2,5 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

L'énergie d'un photon peut être calculée à partir de la longueur d'onde :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{h \times c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{280 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = 7,10 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

Cela vérifie la conservation de l'énergie :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$$

Vers le Bac

Préparation à l'écrit

20 CORRIGÉ Effet photoélectrique et panneaux photovoltaïques

Partie I

$$1. \quad \mathcal{E}_{\text{photon}} \text{ en J} = \frac{h \times c}{\lambda_1} \quad \begin{array}{l} h \text{ en J} \cdot \text{s} \\ c \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1} \\ \lambda_1 \text{ en m} \end{array}$$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}1} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{400 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{photon}1} = 4,97 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

2. Si on n'observe pas d'effet photoélectrique lorsque la longueur d'onde est $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$, c'est que l'énergie de chaque photon n'est alors pas suffisante pour extraire un électron, elle est donc inférieure au travail d'extraction.

3. Le modèle ondulatoire prévoit que l'énergie lumineuse augmente avec la durée d'éclairement. Avec ce modèle, une augmentation de la durée d'éclairement devrait permettre d'extraire des électrons. Ce n'est pas ce qui est observé. L'effet photoélectrique a donc remis en cause le modèle ondulatoire de la lumière.

4. L'énergie du photon permettant d'extraire un électron est en partie utilisée pour extraire un électron. L'excédent est communiqué à l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Pour un électron proche de la surface du métal, la loi de conservation de l'énergie impose : $\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{c \text{ max}}$

L'énergie cinétique maximale de l'électron est alors :

$$\mathcal{E}_{c \text{ max}} = \mathcal{E}_{\text{photon}} - W_{\text{extraction}}$$

$$\text{On a } W_{\text{extraction}} = 2,29 \text{ eV} = 3,66 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

$$\text{Donc } \mathcal{E}_{c \text{ max}} = 4,97 \times 10^{-19} \text{ J} - 3,66 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,31 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

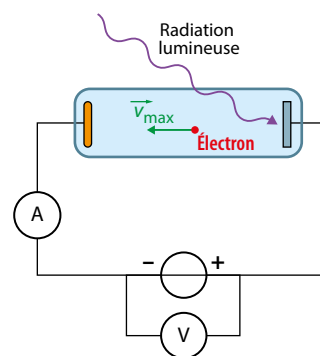
$$\text{De plus, } \mathcal{E}_{c \text{ max}} = \frac{1}{2} \times m_e \times v_{\text{max}}^2.$$

La valeur de la vitesse maximale d'un électron est donc :

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \mathcal{E}_{c \text{ max}}}{m_e}},$$

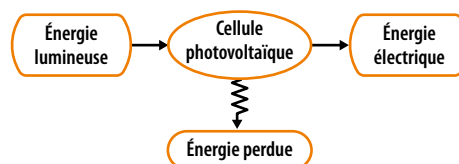
$$\text{soit } v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,31 \times 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 5,36 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

5.



Partie II

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 : $I = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{U}$, soit $I = \frac{180 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 7,5 \text{ A}$.

3. Le rendement est $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$.

La puissance lumineuse reçue par le panneau est proportionnelle à la puissance lumineuse surfacique et à la surface.

De plus, $\text{surface} = \text{longueur} \times \text{largeur}$. Donc :

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} \text{ (en W)} = E \text{ (en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \times S \text{ (en m}^2)$$

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 1318 \times 10^{-3} \text{ m} \times 994 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,31 \times 10^3 \text{ W}$$

La puissance électrique maximale a été déterminée précédemment : $\mathcal{P}_{\text{élec}} = 180 \text{ W}$

Donc le rendement maximal est :

$$\eta = \frac{180 \text{ W}}{1,31 \times 10^3 \text{ W}} = 0,137 \text{ ou } 13,7 \%$$

4.a. Lorsque l'éclairement est de $1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, la puissance électrique maximale d'un panneau est égale à 180 W .

Dans ces conditions, pour produire $3,5 \text{ kWc}$ il faut :

$$\frac{3,5 \times 10^3}{180} = 19,4 \text{ panneaux, soit } 20 \text{ panneaux.}$$

b. L'énergie lumineuse par unité de surface reçue à Lyon cumulée sur une année est égale à $1\,450 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$.

Avec 20 panneaux, l'énergie lumineuse reçue sera :

$$\mathcal{E}_{\text{lum}} = 1\,450 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \times 1\,318 \times 10^{-3} \text{ m} \times 994 \times 10^{-3} \text{ m} \times 20$$

$$\mathcal{E}_{\text{lum}} = 3,80 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h.}$$

Le rendement étant 10% , l'énergie électrique produite sera $\mathcal{E}_{\text{élec}} = 3,80 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

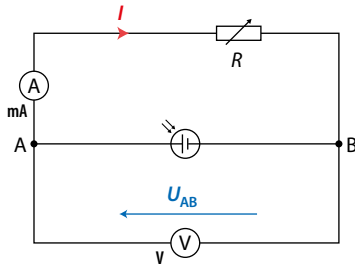
Avec un prix de vente égal $0,20 \text{ €/kW} \cdot \text{h}$, le revenu sera :

$$3,80 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 0,20 \text{ €/kW} \cdot \text{h} = 760 \text{ €.}$$

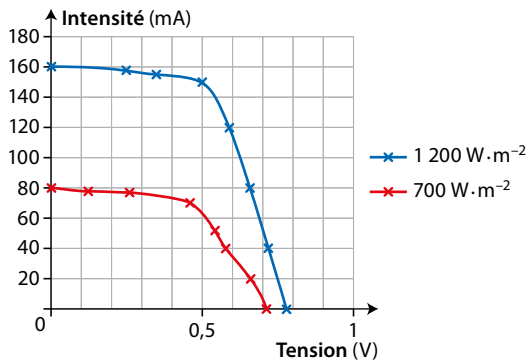
Préparation à l'ECE

Partie I

1.



2.



3.a. Calcul à effectuer : $\mathcal{P}_{\text{élec}}$ (en W) = U (en V) \times I (en A).

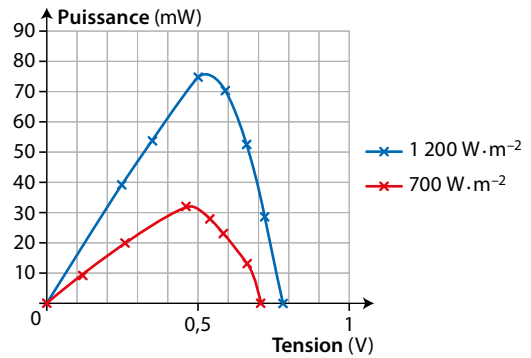
• Cas 1 : éclairement de $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

| | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 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 |
| $\mathcal{P}_{\text{élec}}$ (mW) | 0 | 13,2 | 23,2 | 28,1 | 32,2 | 20,0 | 9,4 | 0 |

• Cas 2 : éclairement de $1\,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

| | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| U_{AB} (V) | 0,78 | 0,72 | 0,66 | 0,59 | 0,5 | 0,35 | 0,25 | 0 |
| I (mA) | 0 | 40 | 80 | 120 | 150 | 155 | 158 | 160 |
| $\mathcal{P}_{\text{élec}}$ (mW) | 0 | 28,8 | 52,8 | 70,8 | 75,0 | 54,3 | 39,5 | 0 |

b.



4.a. Le rendement est $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$.

La puissance lumineuse est $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \times S$ où E est l'éclairement et S la surface du capteur.

Ici $S = 0,042 \text{ m} \times 0,042 \text{ m} = 1,76 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

• Pour $E = 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 1,23 \text{ W}$, et d'après le graphique $\mathcal{P}_{\text{élec max}} = 33 \text{ mW}$,

$$\text{donc } \eta = \frac{0,033 \text{ W}}{1,23 \text{ W}} = 0,027 \text{ soit } 2,7 \%$$

• Pour $E = 1\,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$\mathcal{P}_{\text{lum}} = 2,12 \text{ W}$, et d'après le graphique $\mathcal{P}_{\text{élec max}} = 76 \text{ mW}$,

$$\text{donc } \eta = \frac{0,076 \text{ W}}{2,12 \text{ W}} = 0,036 \text{ soit } 3,6 \%$$

b. La tension correspondant au rendement maximal est obtenue par lecture graphique :

• pour $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$: $U = 0,48 \text{ V}$;

• pour $1\,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$: $U = 0,53 \text{ V}$.

c. On calcule l'intensité par $I = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec max}}}{U}$:

• pour $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$: $I = 68,8 \text{ mA}$;

• pour $1\,200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$: $I = 143 \text{ mA}$.

Partie II

1.a. Dans une association série, la tension aux bornes de l'association est égale à la somme des tensions aux bornes de chaque dipôle. Donc $U = 10 \times U_{\text{cellule max}}$, soit $U = 10 \times 0,53 \text{ V} = 5,3 \text{ V}$.

b. Dans une association série, l'intensité du courant qui traverse chaque dipôle est identique, soit ici $I = 143 \text{ mA}$.

c. $\mathcal{P}_{\text{élec}} = U \times I$

$$\mathcal{P}_{\text{élec}} = 5,3 \text{ V} \times 0,143 \text{ A} = 0,76 \text{ W.}$$

La puissance sera 10 fois plus grande que la puissance obtenue pour une seule cellule.

2. Dans une association dérivation, chaque module est soumis à la même tension $U = 0,53 \text{ V}$.

Dans une association dérivation l'intensité du courant est la somme des intensités des courants délivrés par chaque module :

$$I = 10 \times I_{\text{cellule max}}, \text{ soit } I = 1,43 \text{ A.}$$

$$\mathcal{P}_{\text{élec}} \text{ (en W)} = U \text{ (en V)} \times I \text{ (en A)}$$

$$\mathcal{P}_{\text{élec}} = 0,53 \text{ V} \times 1,43 \text{ A} = 0,76 \text{ W.}$$

La puissance sera ici aussi 10 fois plus grande que la puissance obtenue pour une seule cellule.

3. À partir du calcul du rendement, il n'y a aucune association à privilégier.

Remarque : 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).

Je m'exprime à l'oral sur

La lumière : un flux de photons

• Comment calculer l'énergie d'un photon ?

L'énergie d'un photon se calcule à partir de la fréquence ν de la radiation associée et de la constante de Planck h ou bien à partir de la longueur d'onde λ de la radiation associée et de la constante de Planck h .

$$E_{\text{photon}} = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda}$$

Diagram illustrating the calculation of photon energy:

- h en $J \cdot s$ (Planck constant)
- ν en Hz (frequency)
- λ en m (wavelength)
- c en $m \cdot s^{-1}$ (speed of light)
- E_{photon} en J (photon energy)

• Quel est le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ?

Une cellule photovoltaïque absorbe des photons et convertit leur énergie en énergie électrique.

• Quelles sont les longueurs d'onde des radiations visibles ?

Les longueurs d'onde des radiations visibles sont comprises entre 400 nm pour le violet et 800 nm pour le rouge.

21

Dynamique du dipôle RC

Programme officiel

Ondes et signaux

| 3. Étudier la dynamique d'un système électrique | |
|--|--|
| Notions et contenus | Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i> |
| Intensité d'un courant électrique en régime variable. | Relier l'intensité d'un courant électrique au débit de charges. |
| Comportement capacitif. | Identifier des situations variées où il y a accumulation de charges de signes opposés sur des surfaces en regard. |
| Modèle du condensateur. Relation entre charge et tension ; capacité d'un condensateur. | Citer des ordres de grandeur de valeurs de capacités usuelles. <i>Identifier et tester le comportement capacitif d'un dipôle. Illustrer qualitativement, par exemple à l'aide d'un microcontrôleur, d'un multimètre ou d'une carte d'acquisition, l'effet de la géométrie d'un condensateur sur la valeur de sa capacité.</i> |
| Modèle du circuit RC série : charge d'un condensateur par une source idéale de tension, décharge d'un condensateur, temps caractéristique. | Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge par une source idéale de tension et dans le cas de sa décharge. |
| Capteurs capacitifs. | Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs capacitifs. <i>Étudier la réponse d'un dispositif modélisé par un dipôle RC. Déterminer le temps caractéristique d'un dipôle RC à l'aide d'un microcontrôleur, d'une carte d'acquisition ou d'un oscilloscope.</i> Capacité mathématique : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant. |

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

| Notions | Connaissances et savoir-faire | Modèles associés |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Porteur de charge électrique. Lien entre intensité d'un courant continu et débit de charges. | Relier intensité d'un courant continu et débit de charges. | $I \text{ en A} \rightarrow I = \frac{Q}{\Delta t} \left\{ \begin{array}{l} Q \text{ en C} \\ \Delta t \text{ en s} \end{array} \right.$ |

Vu en première

Les circuits électriques

p. 424

Réactiver ses connaissances

1. On applique la loi des mailles : $U_{AB} = U_{AE} + U_{ED} + U_{DC} + U_{CB}$.

Or $U_{AE} = U_{CB} = 0 \text{ V}$;

donc $U_{ED} = U_{AB} - U_{DC} = 5,0 \text{ V} - 2,2 \text{ V} = 2,8 \text{ V}$.

2. Pour déterminer l'intensité I du courant traversant le conducteur ohmique, on utilise la loi d'Ohm :

$$U_{ED} = R \times I \Rightarrow I = \frac{U_{ED}}{R} = \frac{2,8 \text{ V}}{100 \Omega} = 2,8 \times 10^{-2} \text{ A}.$$

3. D'après la relation entre charge, durée et intensité :

$$Q = I \times \Delta t = 2,8 \times 10^{-2} \text{ A} \times 100 \text{ s} = 2,8 \text{ C}.$$

Flash test

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



Capacités exigibles

- Identifier et tester le comportement capacitif d'un dipôle.
- Illustrer qualitativement, par exemple à l'aide d'un microcontrôleur, d'un multimètre ou d'une carte d'acquisition, l'effet de la géométrie d'un condensateur sur la valeur de sa capacité.

Investigation

1 Étapes de la démarche de résolution :

1^{re} étape : Relire les documents, repérer les éléments en relation avec le problème posé et les noter

1. Un condensateur est constitué de deux conducteurs électriques face à face, séparés par un isolant électrique.
2. La capacité d'un condensateur est sa capacité à stocker des charges électriques.
3. On dispose de feuilles de papier (isolant) et d'aluminium (conducteur) que l'on peut découper.
4. On dispose d'un microcontrôleur et d'un sketch qui permettent de mesurer la capacité ou d'un capacimètre.

2^e étape : Reformuler le problème en utilisant un vocabulaire scientifique

La capacité d'un condensateur évolue-t-elle quand les matériaux qui le constituent ont des dimensions différentes ?

3^e étape : Émettre des hypothèses permettant d'y répondre

- Lorsque la surface du condensateur augmente, la capacité du condensateur augmente.
- Lorsque l'épaisseur de l'isolant du condensateur augmente, la capacité du condensateur augmente.

4^e étape : Élaborer un protocole expérimental et le mettre en œuvre pour valider l'hypothèse formulée

Liste du matériel : feuilles de papier et d'aluminium, ciseaux, colle, appareil de mesure de capacité.

Protocole :

- On réalise un condensateur avec deux feuilles d'aluminium séparées par une feuille de papier ; toutes les feuilles ayant les mêmes dimensions et donc la même surface.
- On modifie les surfaces des deux feuilles de papier d'aluminium séparées par une feuille de papier.
- On intercale un nombre croissant de feuilles de papier entre les feuilles d'aluminium conductrices.
- On mesure la capacité de chacun des condensateurs à l'aide du sketch Arduino fourni ou d'un capacimètre.

5^e étape : Noter les observations, les interpréter et conclure

Voici quelques exemples de capacités obtenues :

– pour une feuille de papier intercalée entre deux feuilles d'aluminium de surfaces S en regard croissantes.

| | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S (m ²) | 0,007 | 0,014 | 0,021 | 0,028 | 0,034 | 0,041 | 0,046 | 0,054 |
| C (pF) | 321 | 502 | 896 | 1 670 | 2 170 | 2 450 | 2 710 | 3 040 |

– pour un nombre croissant de feuilles de papier intercalées entre deux feuilles d'aluminium de surface $S = 0,060$ m² fixes en regard. Pour vérifier l'influence de l'épaisseur d'isolant, nous avons placé un livre sur le condensateur entre chaque mesure pour limiter l'épaisseur d'air entre les feuilles :

| | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|
| Nombre de feuilles | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| C (pF) | 3 730 | 2 240 | 1 165 | 926 | 814 | 638 |

On note que la capacité augmente avec la surface du condensateur et diminue avec l'épaisseur de la couche de papier isolante. La première hypothèse précédente est donc correcte ; la seconde incorrecte.

Par ailleurs, la capacité varie en fonction de la géométrie du condensateur : elle augmente si le condensateur est cylindrique plutôt que plan.

2 Aujourd'hui, pour obtenir un condensateur miniaturisé de capacité de 1 nF, soit l'ordre de grandeur de celle de la bouteille de Leyde, on peut jouer, entre autres, sur l'épaisseur et la nature du diélectrique.

Un pas vers le cours

- 3 Les paramètres dont dépend la capacité d'un condensateur sont :
- la surface des deux conducteurs placés face à face (appelés armatures du condensateur) ;
 - l'épaisseur du matériau isolant ;
 - la géométrie (plane, cylindrique) du condensateur.

Ressources numériques disponibles

Le sketch du microcontrôleur, le schéma du montage, ainsi qu'un fichier explicatif sont disponibles au téléchargement.

Ressources pour le professeur à télécharger :

- Sketch du microcontrôleur
- Explication du montage et du programme Arduino

Proposition de grille d'évaluation par compétence :

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------------|--|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre de quoi est constitué un condensateur. | | | | |
| Analyser-Raisonner | <ul style="list-style-type: none"> – Choisir de constituer différents condensateurs. – Choisir de mesurer la capacité des différents condensateurs. – Comparer les capacités des condensateurs dont un seul paramètre varie. – Établir l'évolution de la capacité en fonction du paramètre choisi. – Établir l'évolution de la capacité en fonction d'un autre paramètre choisi. | | | | |
| Réaliser | <ul style="list-style-type: none"> – Découper les feuilles d'aluminium et de papier aux différentes dimensions choisies. – Constituer les différents condensateurs. – Connecter le microcontrôleur à l'ordinateur, téléverser le sketch fourni, réaliser le montage et exécuter le sketch ou connecter le capacimètre au condensateur. – Mesurer la capacité des différents condensateurs. | | | | |
| Valider | Conclure par la validation ou non des hypothèses formulées. | | | | |

Activité 2

expérimentale Charge et décharge d'un condensateur

p. 426

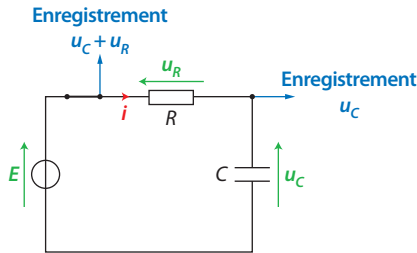
Capacités exigibles

- Étudier la réponse d'un dispositif modélisé par un dipôle RC.
- Réaliser un montage électrique pour étudier la charge et la décharge d'un condensateur dans un circuit RC.
- Respecter les règles de sécurité lors de l'utilisation d'appareils électriques.

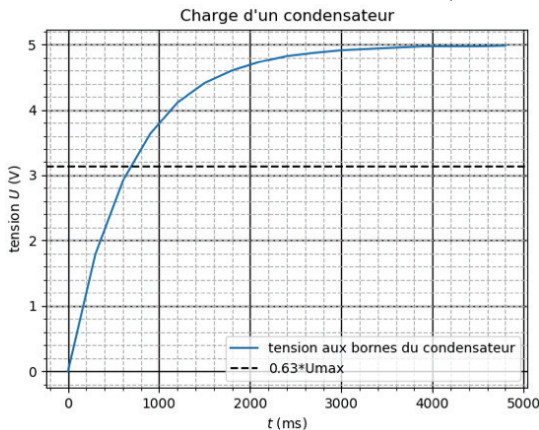
Parcours 1 Pratique expérimentale

Étude de la charge du condensateur

1 Le schéma du circuit électrique est le suivant :



2 La représentation graphique obtenue lors de la charge, à l'aide de mesures réalisées à l'aide d'un microcontrôleur, est la suivante :



On repère deux phases :

- la première phase quand la tension u_c aux bornes du condensateur varie ;
- la seconde phase quand la tension u_c ne varie plus.

3 Pour $t = \tau$, l'expression de u_c devient :

$$u_c = E \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = E \times (1 - e^{-1}) = 0,63 \times E.$$

$$\text{Pour } t \rightarrow +\infty, u_c = E \times \left(1 - e^{-\frac{\infty}{\tau}}\right) = E \times (1 - 0) = E.$$

4 a. Il existe différentes méthodes pour déterminer le temps caractéristique.

Pour notre exemple, par lecture de t pour $u_c = 0,63 \times E$ soit $u_c = 3,15 \text{ V}$, on trouve $\tau = 675 \text{ ms}$.

$$\text{Le produit } R \times C = 2,0 \times 10^3 \Omega \times 330 \times 10^{-6} \text{ F} = 6,6 \times 10^{-1} \text{ s}.$$

b. Le résultat, aux incertitudes de mesure près, est identique pour la décharge.

Un pas vers le cours

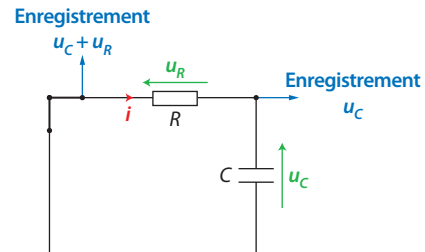
5 Le temps caractéristique d'un dipôle RC se détermine :

- par lecture graphique de la durée t pour laquelle $u_c = 0,63 \times E$ lors de la charge ;

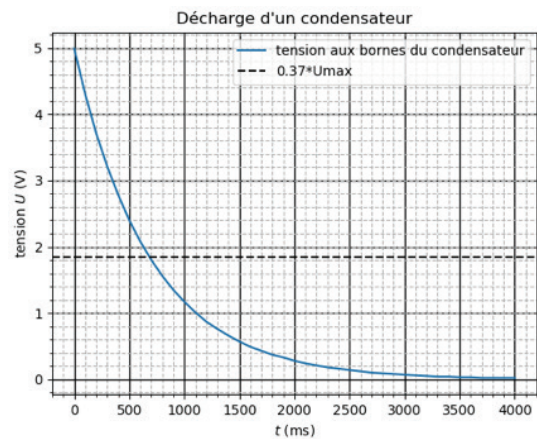
- en traçant la tangente à l'origine, qui coupe l'asymptote d'équation $u_c = E$ à la date $t = \tau$;
- en traçant la courbe $\ln(E - u_c) = f(t)$, qui a pour coefficient directeur $-\frac{1}{\tau}$.

Parcours 2 Pratique expérimentale

1 Le schéma du circuit électrique est le suivant :



2 La représentation graphique obtenue lors de la décharge, à l'aide de mesures réalisées à l'aide d'un microcontrôleur est la suivante :



On repère deux phases :

- la première phase quand la tension u_c aux bornes du condensateur varie ;
- la seconde phase quand la tension u_c ne varie plus.

3 Pour $t = \tau$, l'expression de u_c devient :

$$u_c = E \times e^{-\frac{t}{\tau}} = 0,37 \times E.$$

$$\text{Pour } t \rightarrow 0, \text{ on a : } u_c = E \times e^{-\frac{0}{\tau}} = E.$$

4 a. Il existe différentes méthodes pour déterminer le temps caractéristique.

Pour notre exemple, par lecture de t pour $u_c = 0,37 \times E$ soit $u_c = 1,85 \text{ V}$, on trouve $\tau = 678 \text{ ms}$.

$$\text{Le produit } R \times C = 2,0 \times 10^3 \Omega \times 330 \times 10^{-6} \text{ F} = 6,6 \times 10^{-1} \text{ s}.$$

b. Le résultat, aux incertitudes de mesure près, est identique pour la charge.

Un pas vers le cours

5 Le temps caractéristique d'un dipôle RC se détermine :

- par lecture graphique de la durée t pour laquelle $u_c = 0,37 \times E$ lors de la décharge ;
- en traçant la tangente à l'origine, qui coupe l'asymptote d'équation $u_c = 0$ à la date $t = \tau$;
- en traçant la courbe $\ln(u_c) = f(t)$, qui a pour coefficient directeur $-\frac{1}{\tau}$.

Ressources numériques disponibles

Des fichiers Python permettant d'obtenir la courbe de charge ou de décharge à partir d'un fichier CSV ou directement depuis le microcontrôleur, sont disponibles au téléchargement. Les sketches du microcontrôleur, les schémas du montage, ainsi que les fichiers explicatifs sont également fournis et disponibles.

Ressources pour le professeur à télécharger :

- Fichiers Python (charge et décharge)
- Sketchs du microcontrôleur (charge et décharge)
- Explications des programmes en langage Python
- Explications du montage et des programmes Arduino

Activité 3

expérimentale Des capteurs capacitifs

p. 427

Capacités exigibles

- Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs capacitifs.
- Respecter les règles de sécurité lors de l'utilisation d'appareils électriques.

Pratique expérimentale

1 On réalise un tableau :

| | Capteur de pression (doc. A) | Écran de smartphone (doc. B) |
|-----------------------|--|--|
| Armatures métalliques | Membrane déformable et membrane indéformable | Grilles métalliques (horizontale et verticale) |
| Isolant | Air | Séparateur |

2 Dans le cas du capteur de pression (doc. A), lorsque la pression augmente, la surface d'une des deux membranes se déforme. Il en résulte une variation de l'épaisseur e de l'isolant entre les deux membranes. La capacité du capteur est alors modifiée.

3 a. Lorsqu'on touche le capteur capacitif, on modifie la répartition des charges sur l'écran et sa capacité est modifiée. Une LED servant de témoin s'allume alors.

b. Dans ce capteur comme dans le capteur du smartphone, la répartition des charges électriques sur le conducteur est modifiée

à l'approche et au contact du doigt sur celui-ci. Cela a pour effet de modifier la valeur du champ électrique entre les armatures et de modifier la capacité du condensateur formé par les deux armatures conductrices et l'isolant.

Un pas vers le cours

4 Un capteur capacitif est un capteur dont la capacité varie en fonction d'une grandeur que l'on mesure.

Pour détecter la présence d'un objet à proximité ou un déplacement, les capteurs capacitifs peuvent utiliser la mesure de diverses grandeurs : capacité, charge de leurs surfaces conductrices ou champ électrique à l'intérieur du condensateur.

Ressources numériques disponibles

Une vidéo de démonstration, un fichier explicatif du sketch du microcontrôleur, ainsi que le schéma du montage sont disponibles au téléchargement.

Ressources pour le professeur à télécharger :

- Vidéo de démonstration
- Sketch du microcontrôleur
- Explications du montage et du programme

Capsule vidéo de cours : Charge et décharge d'un condensateur

QCM

p. 433

1. C ; 2. A et C ; 3. B ; 4. C ; 5. A ; 6. A et B ; 7. B et C ; 8. A, B et C ; 9. A, B et C ; 10. A et C.

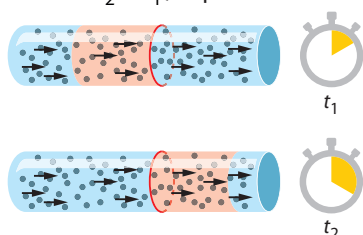
Exercices

Appliquer le cours

p. 436

2 Définir une intensité

1. La relation qui permet de définir l'intensité du courant électrique durant une durée Δt est : $I = \frac{Q}{\Delta t}$ où Q est la quantité de charge, exprimée en coulomb (C), traversant une section de conducteur durant une durée $\Delta t = t_2 - t_1$, exprimée en seconde (s).



2. Dans une portion de conducteur, l'intensité est définie comme la dérivée de la charge électrique par rapport au temps : $i = \frac{dq}{dt}$.

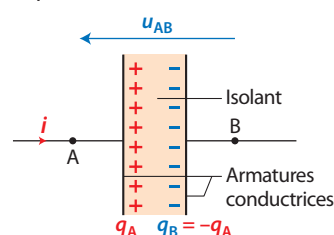
3 Comprendre l'intensité du courant

1. La charge électrique augmente proportionnellement à la durée d'après le graphique.

$$2. I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{6,0 \times 10^{-3} \text{ C}}{4,0 \times 10^{-3} \text{ s}} = 1,5 \text{ A.}$$

4 Comprendre le fonctionnement d'un condensateur

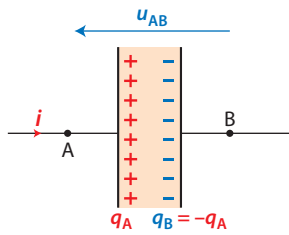
1. L'isolant est situé entre les armatures représentées par les traits verticaux : leur surface interne porte des charges de signes opposés, en égale quantité.



2. On a $i = \frac{dq_A}{dt} > 0$. La charge q_A est une fonction croissante du temps puisque sa dérivée est positive.

5 Exprimer une intensité

1. On a $q_A = q = C \times u_{AB}$ que l'on peut noter $q = C \times u_C$ où $u_C = u_{AB}$ désigne la tension aux bornes du condensateur.



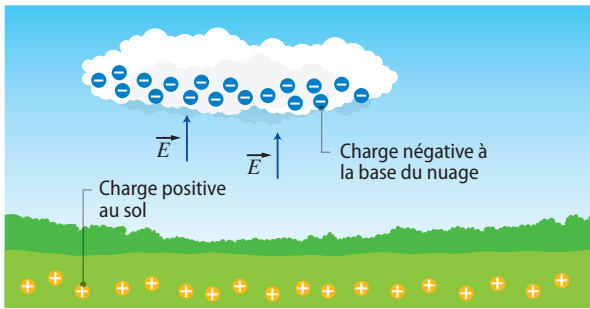
2. En dérivant cette relation par rapport au temps t , on obtient :

$$\frac{dq}{dt} = C \times \frac{du_C}{dt} \text{ soit } i = C \times \frac{du_C}{dt}.$$

6 Identifier un condensateur (1)

1. Le bas du nuage et la surface du sol ont des charges, de signes opposés, qui sont localisées sur les surfaces en regard. C'est l'analogue des deux armatures d'un condensateur. L'air qui s'interpose constitue l'isolant.

2. Le champ électrique \vec{E} est vertical et pointe du sol vers le nuage.



7 Identifier un condensateur (2)

Dans les schémas a et c, on a deux conducteurs en regard, séparés par un isolant. Ces deux schémas représentent des condensateurs.

8 Déterminer la capacité d'un condensateur

1. La relation est $q_A = C \times u_C$ avec ici $u_C = u_{AB}$. La représentation graphique montre que la charge q varie proportionnellement à la tension ; le coefficient de proportionnalité correspond à la capacité du condensateur.

On a donc $C = \frac{\Delta q_A}{\Delta u_C}$, soit ici : $C = \frac{6,0 \times 10^{-6} \text{ C}}{2,7 \text{ V}} = 2,2 \times 10^{-6} \text{ F}$.

2. L'ordre de grandeur de la capacité est le microfarad, qui est un ordre de grandeur usuel.

9 Calculer la charge emmagasinée par un condensateur

Sur la photographie, on peut lire : $C = 150 \mu\text{F}$; $U_{\text{max}} = 200 \text{ V}$. On a donc $q_{\text{max}} = C \times U_{\text{max}}$ soit :

$$q_{\text{max}} = 150 \times 10^{-6} \text{ F} \times 200 \text{ V} = 3,00 \times 10^{-2} \text{ C}.$$

10 Différencier charge et décharge d'un condensateur

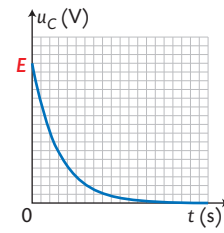
• La charge correspond au circuit pour lequel l'interrupteur est en position 1. La tension évolue aux bornes du condensateur selon le schéma b.

• La décharge correspond au circuit pour lequel l'interrupteur est en position 2. La tension évolue aux bornes du condensateur selon le schéma a.

11 Évaluer l'évolution d'une tension

1. En position 1, le condensateur est initialement chargé. On réalise la décharge du condensateur en plaçant l'interrupteur en position 2.

2. La courbe $u_C = f(t)$ est la suivante :



12 Établir une équation différentielle (1)

1. D'après la loi des mailles, $u_R + u_C = E$.

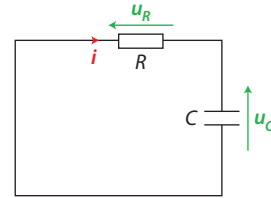
2. D'après la loi d'Ohm, $u_R = R \times i$ d'où $R \times i + u_C = E$.

3. Comme $i = C \times \frac{du_C}{dt}$, on en déduit l'équation différentielle :

$$R \times C \times \frac{du_C}{dt} + u_C = E.$$

13 Établir une équation différentielle (2)

1. Le schéma du circuit est le suivant :



2. D'après la loi des mailles, $u_R + u_C = 0$.

3. D'après la loi d'Ohm, $u_R = R \times i$. De plus, $i = \frac{dq}{dt} = C \times \frac{du_C}{dt}$.

On en déduit l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur lors de sa décharge :

$$R \times C \times \frac{du_C}{dt} + u_C = 0.$$

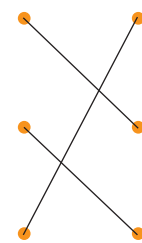
14 Côté maths

Résoudre une équation différentielle

$$y' = 2y + 3 \text{ avec } y(0) = -1$$

$$y' = 2y \text{ avec } y(0) = 5$$

$$y' = 2y + 3 \text{ avec } y(0) = 3$$



$$y = \frac{9}{2} \times e^{2x} - \frac{3}{2}$$

$$y = \frac{1}{2} \times e^{2x} - \frac{3}{2}$$

$$y = 5 \times e^{2x}$$

15 Résoudre une équation différentielle

1. Les solutions d'une équation de la forme $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K une constante d'intégration réelle.

2. Par identification, on trouve $a = -\frac{1}{R \times C}$ et $b = \frac{E}{R \times C}$ donc

$$\frac{b}{a} = -E. \text{ La solution générale est } u_C = K \times e^{-\frac{t}{R \times C}} + E.$$

16 Trouver la solution d'une équation différentielle

D'après l'expression de $u_C = K \times e^{-\frac{t}{R \times C}}$, on en déduit que pour $t = 0 \text{ s}$, $u_C = K$. Graphiquement, on lit : $u_C(0) = K = 8,0 \text{ V}$.

17 Calculer un temps caractéristique

1. On a $\tau = R \times C$, soit :

$$\tau = 1,0 \times 10^3 \Omega \times 47 \times 10^{-6} \text{ F} = 47 \times 10^{-3} \text{ s}.$$

Le temps caractéristique est 47 ms.

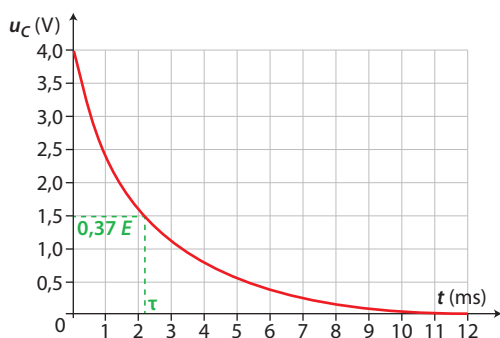
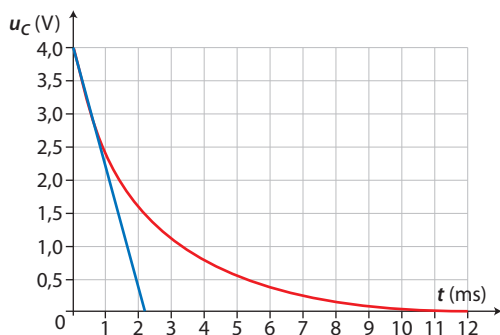
2. D'après la loi d'Ohm, $u = R \times i$ donc $1 \Omega = 1 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$.

D'après la relation $i = C \times \frac{du_C}{dt}$, on déduit : $1 \text{ F} = 1 \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1}$.

Ainsi, le produit $R \times C$ s'exprime en : $\text{V} \cdot \text{A}^{-1} \times \text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} = \text{s}$.

18 Déterminer une capacité par évaluation d'un temps caractéristique

1. Graphiquement, par la méthode de la tangente à l'origine, ou par détermination de t pour $u_C = 0,37 \times E$, soit $u_C = 0,37 \times 4,0 \text{ V} = 1,48 \text{ V}$, on lit $\tau = 2,2 \text{ ms}$.



2. Comme $\tau = R \times C$, on a :

$$C = \frac{\tau}{R} \text{ soit } C = \frac{2,2 \times 10^{-3} \text{ s}}{1,0 \times 10^3 \Omega} = 2,2 \times 10^{-6} \text{ F} \text{ soit } 2,2 \mu\text{F}.$$

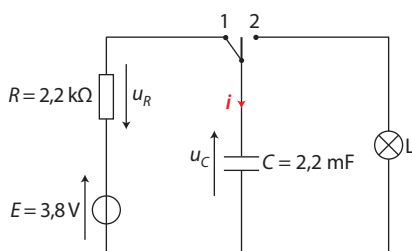
Exercices

S'entraîner

p. 438

19 Flash d'un appareil photographique

1. Pour que le condensateur se charge, il est nécessaire de placer l'interrupteur en position 1.



2. D'après la loi des mailles : $u_R + u_C = E$.

$$\text{D'après la loi d'Ohm, } u_R = R \times i \text{ avec } i = \frac{dq}{dt} = C \times \frac{du_C}{dt}.$$

On en déduit l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur lors de sa décharge :

$$R \times C \times \frac{du_C}{dt} + u_C = E.$$

$$\text{Ce qui s'écrit aussi : } \frac{du_C}{dt} = \frac{-1}{R \times C} \times u_C + \frac{E}{R \times C}.$$

3. Les solutions d'une équation de la forme $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K une constante d'intégration réelle.

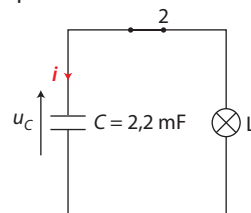
Par identification, on trouve $a = -\frac{1}{R \times C}$ et $b = \frac{E}{R \times C}$ donc

$$\frac{b}{a} = -E. \text{ Donc } u_C = K \times e^{-\frac{t}{R \times C}} + E.$$

Pour $t = 0 \text{ s}$, on a $u_C = K + E = 0 \text{ V}$ d'après les conditions initiales.

$$\text{Ainsi } K = -E \text{ et } u_C = -E \times e^{-\frac{t}{R \times C}} + E = E \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right).$$

4. Le circuit correspondant à la décharge est celui pour lequel l'interrupteur est en position 2.



5. La durée nécessaire pour que le condensateur soit déchargé à 99 % est $\Delta t = 5\tau$. Ainsi :

$$\Delta t = 5R \times C \Rightarrow R = \frac{\Delta t}{5C} \text{ soit } R = \frac{0,1 \text{ s}}{5 \times 2,2 \times 10^{-3} \text{ F}} = 9 \Omega.$$

20 Supercondensateurs

1. Les ordres de grandeur des capacités usuelles sont le nanofarad, le microfarad.

2. Ces condensateurs ont des capacités bien supérieures aux condensateurs usuels. Ce sont donc des supercondensateurs !

3. L'énergie stockée dans un supercondensateur chargé est :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} C \times U^2 \text{ soit } \mathcal{E} = \frac{1}{2} \times 177 \text{ F} \times (51 \text{ V})^2 = 2,3 \times 10^5 \text{ J}.$$

4. L'ordre de grandeur de l'énergie stockée par le supercondensateur est bien plus faible. Cependant, il se recharge en quelques secondes, lors des arrêts fréquents du bus, permettant son utilisation tout au long de la journée. Ceci ne serait pas possible avec une batterie classique nécessitant beaucoup plus de temps pour se recharger.

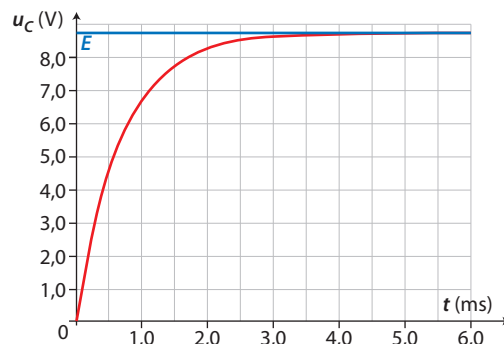
21 Connaître les critères de réussite

Caractéristiques d'une pile

1. Pour $t \rightarrow +\infty$, u_C tend vers $E \times \left(1 - e^{-\frac{\infty}{\tau}}\right) = E \times (1 - 0) = E$.

Graphiquement, on repère l'asymptote horizontale de la courbe lorsque t tend vers l'infini.

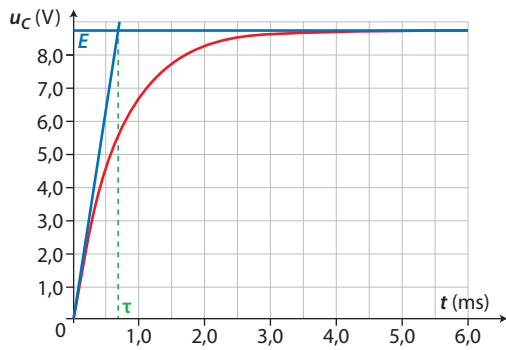
On trouve graphiquement $E = 8,8 \text{ V}$.



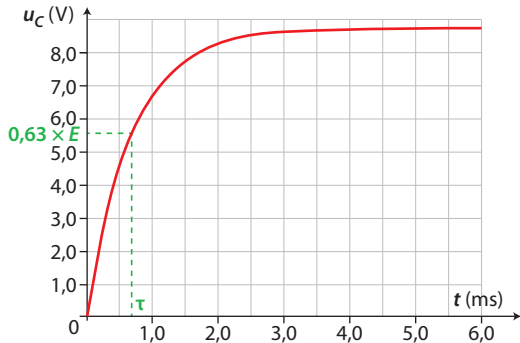
2. On retrouve graphiquement le temps caractéristique à partir de l'une des deux méthodes suivantes :

• La tangente à l'origine coupe l'asymptote d'équation $u_C = E$ pour $t = \tau$.

$$\tau = r \times C \Rightarrow r = \frac{\tau}{C}$$



• Pour $t = \tau$, on a $u_C = 0,63 E$.



Dans les deux cas, on lit $\tau = 0,7$ ms.

3. Par définition $\tau = r \times C \Rightarrow r = \frac{\tau}{C}$

$$\text{soit } r = \frac{0,7 \times 10^{-3} \text{ s}}{0,10 \times 10^{-3} \text{ F}} = 7 \Omega.$$

22 Le défibrillateur

1. Lors de la charge du condensateur, l'interrupteur K_1 est fermé. L'interrupteur K_2 est ouvert.

D'après la loi des mailles, $u_r + u_C = E$.

D'après la loi d'Ohm, $u_r = r \times i$ avec $i = \frac{dq}{dt} = C \times \frac{du_C}{dt}$.

On en déduit l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur lors de sa charge : $r \times C \times \frac{du_C}{dt} + u_C = E$.

Ce qui s'écrit aussi : $\frac{du_C}{dt} = \frac{-1}{r \times C} \times u_C + \frac{E}{r \times C}$.

2. Les solutions d'une équation de la forme $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K une constante d'intégration réelle.

Par identification, on trouve $a = -\frac{1}{r \times C}$ et $b = \frac{E}{r \times C}$ soit $\frac{b}{a} = -E$.

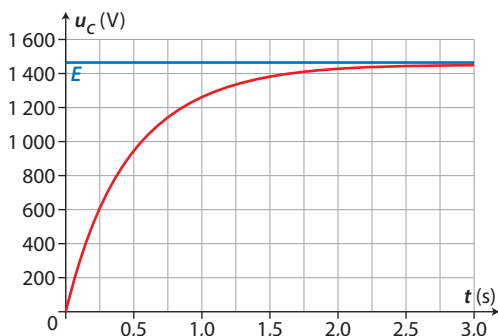
Donc $u_C = K \times e^{-\frac{t}{r \times C}} + E$.

Pour $t = 0$ s, d'après les conditions initiales, $u_C = K + E = 0$ V. Ainsi

$K = -E$ donc $u_C = -E \times e^{-\frac{t}{r \times C}} + E = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$ avec $\tau = r \times C$.

Pour $t \rightarrow \infty$, $u_C = E \left(1 - e^{-\frac{\infty}{\tau}} \right) = E(1 - 0) = E$.

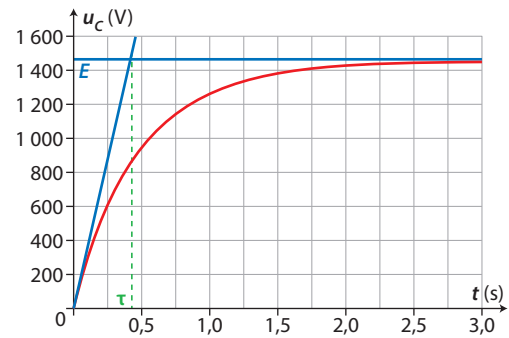
Graphiquement, on repère l'asymptote horizontale de la courbe lorsque t tend vers l'infini.



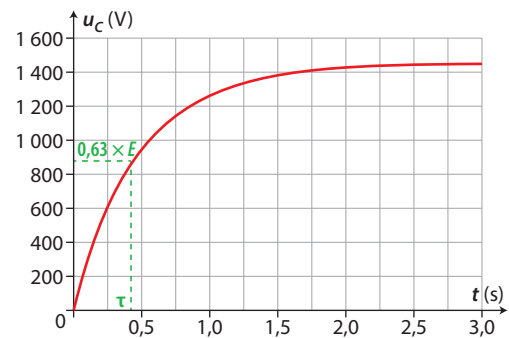
On détermine graphiquement $E = 1\,450$ V.

3. On retrouve graphiquement le temps caractéristique à partir de l'une des deux méthodes suivantes :

• La tangente à l'origine coupe l'asymptote d'équation $u_C = E$ pour $t = \tau$.



• Pour $t = \tau$, on a $u_C = 0,63 E$.



On trouve $\tau = 0,45$ s.

4. Par définition $\tau = r \times C \Rightarrow r = \frac{\tau}{C}$;

$$\text{soit } r = \frac{0,45 \text{ s}}{470 \times 10^{-6} \text{ F}} = 9,9 \times 10^2 \Omega.$$

5. Le thorax est assimilé à un conducteur ohmique, la tension à ses bornes vérifie la loi d'Ohm : $u_R = R \times i$.

Lors de la décharge, d'après la loi des mailles : $u_R = u_C$.

Or, au début de la décharge, $u_C = E = 1\,450$ V.

Soit $R \times i = E$; l'intensité circulant à travers le thorax est donc :

$$i = \frac{E}{R} = \frac{1\,450 \text{ V}}{50 \Omega} = 29 \text{ A}.$$

23 Leyden Jar

Traduction : Les bouteilles de Leyde ont été inventées au milieu du XVIII^e siècle. Elles doivent leur nom à l'Université de Leyde où se sont tenues les premières expérimentations. Ces dispositifs, bien que simples, ont représenté une percée significative dans l'histoire de l'électricité, dans la mesure où il s'agissait des premiers condensateurs et qu'en tant que tels, ils pouvaient stocker la charge électrique. Depuis un siècle, les scientifiques savaient créer de l'électricité statique avec des générateurs électrostatiques. Ils étaient maintenant capables de la stocker.

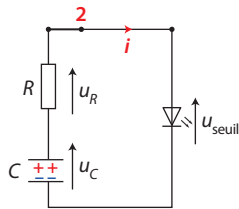
1. La bouteille de Leyde est un condensateur. Identifier ce qui correspond aux armatures et ce qui correspond au diélectrique.
2. Quelle est la propriété du condensateur découverte à Leyde ?

Réponses

1. La bouteille de Leyde comporte des armatures (fil et plateau en laiton) métalliques alors que l'isolant est constitué du flacon en verre et de l'air qui le remplit.
2. On peut piéger une charge électrique relativement importante pour l'époque dans ce dispositif.

24 Lampe rechargeable

1. Le schéma de la décharge correspond à l'instant où l'interrupteur est placé en position 2.



2. $i = -C \times \frac{du_C}{dt}$; en remplaçant u_C par son expression, on en déduit :

$$i = -C \times \frac{d}{dt} \left((E - u_{\text{seuil}}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + u_{\text{seuil}} \right)$$

$$i = -C \times \left(-\frac{1}{\tau} \times (E - u_{\text{seuil}}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

De plus $\tau = R \times C$, d'où $i = \frac{E - u_{\text{seuil}}}{R} \times e^{-\frac{t}{\tau}}$.

3. L'intensité $i = 10 \text{ mA}$ est atteinte pour une durée Δt telle que :

$$i = \frac{E - u_{\text{seuil}}}{R} \times e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \Rightarrow e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = \frac{Ri}{E - u_{\text{seuil}}}$$

$$\text{d'où } \Delta t = -R \times C \times \ln \left(\frac{R \times i}{E - u_{\text{seuil}}} \right).$$

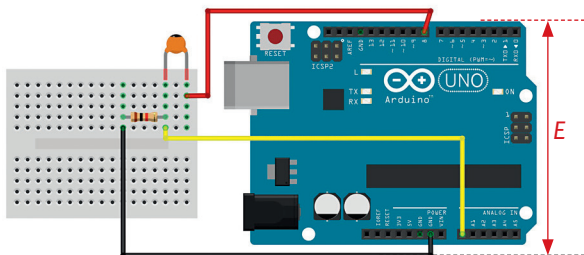
Application numérique :

$$\Delta t = -220 \, \Omega \times 4,0 \text{ F} \times \ln \left(\frac{220 \, \Omega \times 10 \times 10^{-3} \text{ A}}{5,5 \text{ V} - 2,0 \text{ V}} \right) = 4,1 \times 10^2 \text{ s}$$

soit environ 7 minutes.

25 Détermination d'une capacité

1. D'après la loi des mailles, $E = u_R + u_C$, sachant que E est la tension entre les deux bornes 8 et GND égale à 5,00 V.



On déduit de cette relation l'expression de :

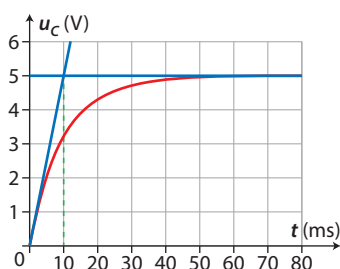
$$u_C = E - u_R \text{ soit } u_C = 5,00 - u_R.$$

On calcule les valeurs de u_C consignées dans le tableau suivant :

| | | | | | | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t \text{ (ms)}$ | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| $u_R \text{ (V)}$ | 3,03 | 1,84 | 1,12 | 0,68 | 0,41 | 0,25 | 0,15 |
| $u_C \text{ (V)}$ | 1,97 | 3,16 | 3,88 | 4,32 | 4,59 | 4,75 | 4,85 |

| | | | | | | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t \text{ (ms)}$ | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |
| $u_R \text{ (V)}$ | 0,09 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| $u_C \text{ (V)}$ | 4,91 | 4,94 | 4,97 | 4,98 | 4,99 | 4,99 | 5,00 |

2. La représentation graphique de la courbe $u_C = f(t)$ est la suivante :



3. On relève par la méthode de la tangente $\tau = 10,0 \text{ ms}$.

4. $\tau = R \times C$ d'où $C = \frac{\tau}{R}$ soit $C = \frac{10,0 \times 10^{-3} \text{ s}}{1,0 \times 10^3 \, \Omega}$;

$C = 10 \times 10^{-6} \text{ F}$ ou $10 \, \mu\text{F}$.

5. Pour améliorer la détermination de la capacité C , il est préférable d'augmenter le nombre de points de mesure pour obtenir une courbe plus précise et pour mieux lisser la courbe de la tension observée ; il faut donc diminuer l'intervalle de temps entre deux mesures pour la même durée d'enregistrement.

26 Résolution de problème

Condensateur et sécurité

1^{re} étape : S'approprier la question posée

1. Quelle est la capacité du condensateur ?
2. Quelle est la valeur du temps caractéristique pour le dipôle RC ?

2^e étape : Lire et comprendre les documents

Le document indique que l'on réalise la décharge du condensateur à travers un conducteur ohmique de résistance $R = 2,0 \times 10^3 \, \Omega$. Sur la photographie, on lit la capacité du condensateur $C = 1\,000 \, \mu\text{F}$. Le document indique également que le condensateur doit être déchargé à 99 % ; ce qui correspondra à une tension u_C égale à 1 % de E au bout de la durée recherchée.

3^e étape : Dégager la problématique

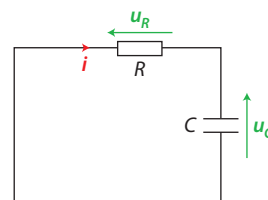
Pour quelle durée, le dipôle RC ainsi réalisé sera-t-il déchargé à 99 % ?

4^e étape : Construire la réponse

- Établir le schéma du circuit électrique.
- Établir l'expression de la tension u_C aux bornes du condensateur lors de sa décharge.
- Dédire de cette relation la durée au bout de laquelle, le dipôle RC sera déchargé à 99 %.
- Conclure.

5^e étape : Répondre

Le schéma du circuit électrique est le suivant et correspond à une décharge :



D'après la loi des mailles, $u_R + u_C = 0$.

D'après la loi d'Ohm, $u_R = R \times i$ et $i = \frac{dq}{dt} = C \times \frac{du_C}{dt}$.

On en déduit l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur lors de sa décharge :

$$R \times C \times \frac{du_C}{dt} + u_C = 0.$$

Les solutions d'une équation de la forme $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K une constante d'intégration réelle.

Par identification, on trouve $a = -\frac{1}{R \times C}$ et $b = 0$, donc $\frac{b}{a} = 0$.

$$\text{Donc : } u_C = K \times e^{-\frac{t}{R \times C}}.$$

Pour $t = 0 \text{ s}$, on a $u_C = E$. Ainsi $K = E$.

La tension u_C aux bornes du condensateur vérifie la relation :

$$u_C = E \times e^{-\frac{t}{R \times C}}.$$

D'après la photographie $C = 1\,000 \, \mu\text{F}$. On peut calculer le temps caractéristique :

$$\tau = R \times C \text{ soit } \tau = 2,0 \times 10^3 \, \Omega \times 1\,000 \times 10^{-6} \text{ F} = 2,0 \text{ s}.$$

Le condensateur est déchargé à 99 % si $u_C = 1 \%$ de E ;

$$\text{soit } \frac{u_C}{E} = 0,01 \text{ ou } \frac{E \times e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}}{E} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = 0,01.$$

On a donc : $\frac{\Delta t}{\tau} = -\ln 0,01 = 4,6 \Rightarrow \Delta t = 4,6 \times \tau$
 soit $\Delta t = 4,6 \times 2,0 \text{ s} = 9,2 \text{ s}$.

Il faut attendre au moins 10 secondes pour décharger totalement le condensateur.

27 Capteur capacitif de pression

1. La pression relative mesurée est nulle.
2. Le capteur peut être assimilé à un condensateur plan car il est constitué de deux armatures planes ou quasiment séparées par un isolant (couche d'air).
3. Si la pression externe exercée à la base du capteur augmente et devient supérieure à la pression atmosphérique, l'épaisseur du condensateur diminue. D'après la relation du doc. B, la capacité est inversement proportionnelle à l'épaisseur e donc la capacité du capteur augmente.

4. a. $C = \frac{8,85 \times 10^{-12} \times S}{e}$ avec $S = \frac{\pi \times D^2}{4}$; on trouve :

$$C = \frac{8,85 \times 10^{-12} \times \pi \times D^2}{4e};$$

$$\text{soit } C = \frac{8,85 \times 10^{-12} \times \pi \times (10 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{4 \times 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}} = 7,0 \times 10^{-11} \text{ F}.$$

b. L'ordre de grandeur de cette capacité, 10^{-10} F , est usuel.

28 À chacun son rythme

Dans 40 s, l'alarme se déclenche...

1. Déterminons l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur lorsqu'un utilisateur entre dans l'appartement. Dans ce cas, l'interrupteur K est ouvert, donc :

- d'après la loi des mailles : $u_R + u_C = E$;
- d'après la loi d'Ohm : $u_R = R \times i$ avec $i = \frac{dq}{dt} = C \times \frac{du_C}{dt}$.

On en déduit l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur lors de sa charge : $R \times C \times \frac{du_C}{dt} + u_C = E$.

$$\text{Ce qui s'écrit aussi : } \frac{du_C}{dt} = \frac{-1}{R \times C} u_C + \frac{E}{R \times C}.$$

2. Les solutions d'une équation du type $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K une constante d'intégration réelle.

Par identification, on trouve $a = -\frac{1}{R \times C}$ et $b = \frac{E}{R \times C}$, donc $\frac{b}{a} = -E$.

Les solutions s'écrivent : $u_C = K \times e^{-\frac{t}{RC}} + E$.

Pour $t = 0 \text{ s}$, on a $u_C = K + E = 0 \text{ V}$ d'après les conditions initiales (le condensateur est déchargé). Ainsi $K = -E$ et

$$u_C = -E \times e^{-\frac{t}{RC}} + E \text{ soit } u_C = E \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \text{ avec } \tau = R \times C.$$

3. L'alarme se déclenche pour une durée $\Delta t = t_{\text{décl}} - 0$ telle que $u_C = 5,0 \text{ V}$. Il vient alors :

$$\frac{u_C}{E} = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \Rightarrow e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = 1 - \frac{u_C}{E}$$

$$\text{soit } \Delta t = -\tau \times \ln\left(1 - \frac{u_C}{E}\right)$$

$$\text{soit } \Delta t = -R \times C \times \ln\left(1 - \frac{u_C}{E}\right), \text{ donc :}$$

$$\Delta t = -1,0 \times 10^6 \Omega \times 22 \times 10^{-6} \text{ F} \times \ln\left(1 - \frac{5,0 \text{ V}}{6,0 \text{ V}}\right) = 39 \text{ s}.$$

29 Python

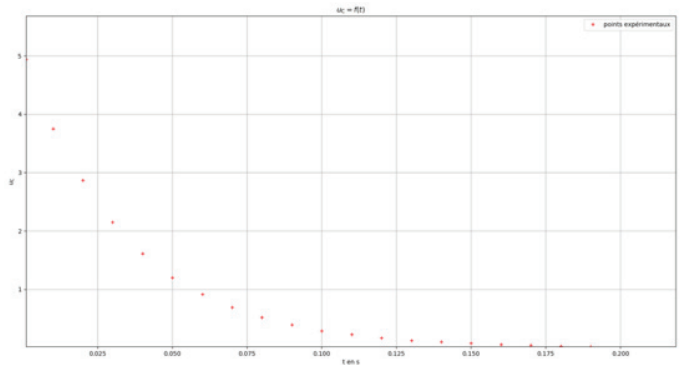
Temps caractéristique

Ressources pour le professeur à télécharger :

- Fichier Python
- Explications du programme en langage Python

1. On met en œuvre le programme.

La courbe fournie est la suivante :



Il s'agit d'une décharge du condensateur car u_C décroît au cours du temps. Par lecture graphique à $t = 0 \text{ s}$, on lit la tension sous laquelle le condensateur a été initialement chargé : $E = 5 \text{ V}$ environ.

2. Lors de la décharge, la tension aux bornes du condensateur est définie par :

$$u_C = E \times e^{-\frac{t}{R \times C}} \Rightarrow \ln u_C = \ln\left(E \times e^{-\frac{t}{R \times C}}\right) = \ln E - \frac{t}{R \times C}.$$

3. Il est nécessaire de calculer les valeurs de $\ln u_C$. Pour cela, on rentre la ligne suivante dans le programme :

```
40 Intension=np.log(tension)
```

ou

```
40 Intension=[np.log(valeurs) for valeurs in tension]
```

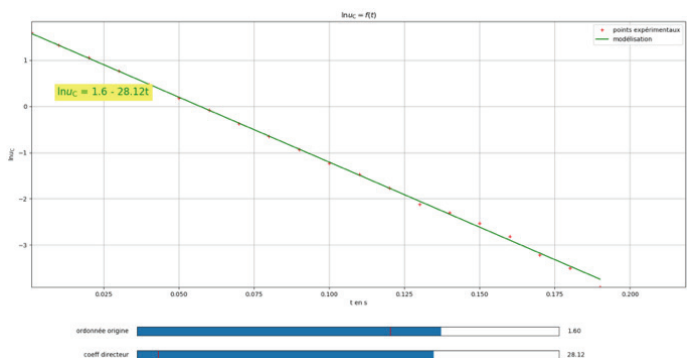
ou encore

```
40 for i in range(len(tension))
```

```
41     Intension=Intension+[np.log(tension[i])]
```

Le programme affiche directement la courbe si la liste `Intension` n'est pas vide.

4. On obtient la représentation graphique suivante :



L'équation de la courbe est :

$$\ln u_C = 1,6 - 28,12 \times t \text{ (unités SI)}.$$

5. D'après 2. et 4. on a :

$$-28,12 \text{ s}^{-1} = -\frac{1}{R \times C} \text{ d'où } \tau = \frac{1}{28,12 \text{ s}^{-1}}$$

$$\text{soit } C = \frac{1}{28,12 \text{ s}^{-1} \times R} = \frac{1}{28,12 \text{ s}^{-1} \times 220 \Omega} = 1,62 \times 10^{-4} \text{ F}.$$

Préparation à l'écrit

28 **Airbag et condensateur**

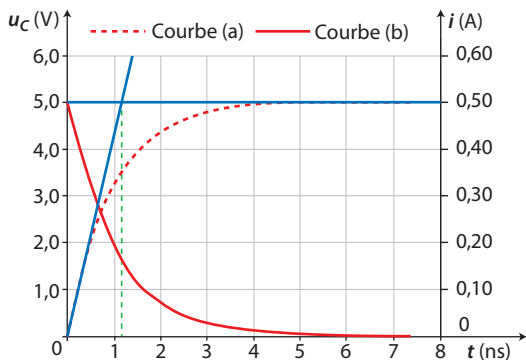
Partie I

1. La capacité du condensateur est de 100 pF, ce qui est de l'ordre de grandeur des capacités usuelles.

2. À l'instant $t = 0$ s, le condensateur est déchargé, donc la tension à ses bornes est nulle.

La courbe (b) représente donc la courbe $u_C = f(t)$. Au bout d'un temps suffisamment long, le condensateur est chargé (la tension à ses bornes est égale à celle du générateur) et l'intensité du courant dans le circuit est $i = 0$ A. La courbe (a) représente donc l'évolution temporelle du courant i .

3. a. Graphiquement, on peut utiliser la méthode de la tangente à l'origine.



On trouve graphiquement $\tau = 1,2$ ns.

b. Ce temps est extrêmement court comparé à la durée du choc de 200 ms. Le condensateur a largement le temps d'être chargé, donc l'airbag se déclenchera pendant le choc.

4. Établissons l'équation différentielle de la charge du condensateur :

– d'après la loi des mailles : $u_R + u_C = E$;

– d'après la loi d'Ohm : $u_R = R \times i$ avec $i = \frac{dq}{dt} = C \times \frac{du_C}{dt}$;

On en déduit l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur lors de sa charge : $R \times C \times \frac{du_C}{dt} + u_C = E$.

Ce qui s'écrit aussi : $\frac{du_C}{dt} = \frac{-1}{R \times C} u_C + \frac{E}{R \times C}$.

5. Les solutions d'une équation de la forme $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K une constante d'intégration réelle.

Par identification, on trouve $a = -\frac{1}{R \times C}$ et $b = \frac{E}{R \times C}$, donc

$\frac{b}{a} = -E$. Les solutions sont de la forme $u_C = K \times e^{-\frac{t}{R \times C}} + E$.

Pour $t = 0$ s, on a $u_C = K + E = 0$ V d'après les conditions initiales. Ainsi $K = -E$ et :

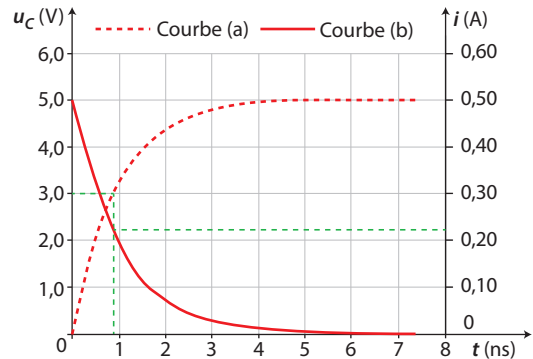
$u_C = -E \times e^{-\frac{t}{R \times C}} + E = E \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$ avec $\tau = R \times C$.

6. D'après la solution $\tau = R \times C \Rightarrow R = \frac{\tau}{C}$

soit $R = \frac{1,2 \times 10^{-9} \text{ s}}{100 \times 10^{-12} \text{ F}} = 12 \ \Omega$.

L'ordre de grandeur de la résistance est de la dizaine d'ohms.

7. On a à tout instant : $u_R = R \times i$.



Prenons une valeur quelconque du graphique.

Pour $u_C = 3,0$ V, on a $i = 0,21$ A. D'après la loi des mailles, $u_R = E - u_C$ soit $u_R = 5,0 - 3,0 = 2,0$ V.

On en déduit : $R = \frac{u_R}{i} = \frac{2,0 \text{ V}}{0,21 \text{ A}} = 9,5 \ \Omega$.

On retrouve bien le même ordre de grandeur.

Partie II

1. Le rapprochement des deux armatures entraîne une diminution de la distance d et une augmentation de la capacité C . La bonne expression est celle pour laquelle C et d sont inversement proportionnelles, soit l'expression (b).

2. L'interrupteur a été fermé au moment de la mise sous tension de l'accéléromètre bien avant le choc. Comme le temps caractéristique du dipôle d'après la question 1.3. b. est très inférieur à la durée du choc, on peut considérer que la charge du condensateur a été instantanée. On a donc $u_C = E$.

De plus $q = C \times u_C$ d'où $q = C \times E$.

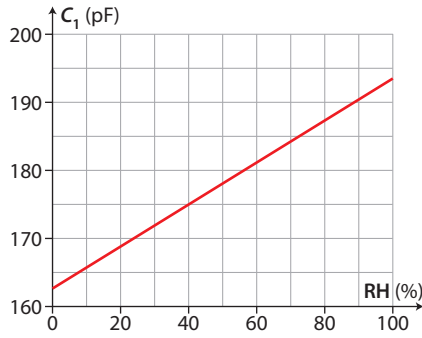
3. Le choc ne modifie pas la force électromotrice de la pile E . La tension aux bornes du condensateur reste donc la même : $u_C = E = 5,0$ V.

Or $q = C \times u_C$; comme la capacité C du condensateur augmente avec le choc, et que la tension u_C reste inchangée, la charge q du condensateur augmente lors du choc : le condensateur de capacité plus grande continue à se charger !

Cette variation Δq de la charge q au niveau de chaque armature du condensateur en une durée Δt entraîne le passage d'un courant d'intensité moyenne $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, lequel peut être détecté. Ce courant est de même sens que lors de la charge du condensateur.

Préparation à l'ECE

1. Représentons le graphique de $C_1 = f(RH)$.



2. La modélisation de la courbe donne une fonction affine d'équation $C_1 = 1,6 \times 10^2 + 3,1 \times 10^{-1} \times RH$ (avec deux chiffres significatifs). On retrouve bien l'expression demandée.

3. Dans cette association série, chaque condensateur porte la même charge et donc : $q = C_1 \times u_{C_1} = C_2 \times u_{C_2}$ d'où $C_1 = C_2 \times \frac{u_{C_2}}{u_{C_1}}$.

Recherchons u_{C_2} :

D'après la loi des mailles : $E = u_{C_1} + u_{C_2}$.

On a donc :

$$u_{C_2} = E - u_{C_1} \text{ soit } u_{C_2} = 3,30 \text{ V} - 1,83 \text{ V} = 1,47 \text{ V}.$$

D'où la capacité du capteur d'humidité :

$$C_1 = 220 \text{ pF} \times \frac{1,47 \text{ V}}{1,83 \text{ V}} = 177 \text{ pF}.$$

La courbe $C_1 = f(RH)$ ou courbe d'étalonnage du capteur d'humidité nous permet d'obtenir, pour $C_1 = 177 \text{ pF}$, un taux d'humidité $RH = 55 \%$ à l'aide de l'équation de la droite ou par lecture graphique.

Vers l'oral

p. 444

Je m'exprime à l'oral sur

Le dipôle RC

• Citer une application des condensateurs.

La fonction principale d'un condensateur est de stocker des charges électriques dans le but de les restituer pour les besoins de l'appareil sur lequel il est utilisé. Les condensateurs sont présents dans les flashes d'appareils photographiques, dans les air-bags, etc.

• Quelle est l'expression du temps caractéristique d'un dipôle RC ?

Le temps caractéristique d'un dipôle RC se note τ . Il est défini par le produit de la résistance R du conducteur ohmique constituant

le dipôle RC, exprimée en ohm, par la capacité C du condensateur, exprimée en farad : $\tau = R \times C$.

• Montrer le lien entre un orage et un condensateur chargé.

Lors d'un orage, une accumulation de charges électriques peut avoir lieu entre le nuage et le sol, l'air jouant le rôle d'un diélectrique. Si la valeur du champ électrique entre la surface de la base du nuage et le sol devient trop importante, l'air ne joue plus son rôle d'isolant, un arc électrique se déclenche. C'est l'éclair de l'orage.

1.a. Mesure de $5\lambda_0$ sur le schéma **A** : la distance correspondant à $5\lambda_0$ est environ 2,45 fois plus grande que le segment d'échelle mesurant 1,0 m. Ainsi, $5\lambda_0 = 2,45$ m et $\lambda_0 = 0,49$ m. On procède de même pour λ' . On obtient $\lambda' = 0,33$ m.

b. Longueur d'onde et fréquence sont reliées par :

$$\lambda = \frac{v_{\text{son}}}{f} \text{ . Donc } f = \frac{v_{\text{son}}}{\lambda} \text{ .}$$

$$f_0 = \frac{v_{\text{son}}}{\lambda_0} \text{ soit } f_0 = \frac{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0,49 \text{ m}} = 7,0 \times 10^2 \text{ Hz.}$$

$$f' = \frac{v_{\text{son}}}{\lambda'} \text{ soit } f' = \frac{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0,33 \text{ m}} = 1,0 \times 10^3 \text{ Hz.}$$

c. Le décalage Doppler est $\Delta f = f_R - f_E$ avec f_E fréquence de l'onde sonore émise, ici f_0 et f_R fréquence de l'onde reçue lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie, ici f' .

$$\Delta f = f' - f_0 = \frac{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0,33 \text{ m}} - \frac{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0,49 \text{ m}} = 3 \times 10^2 \text{ Hz.}$$

Le décalage Doppler Δf est positif, donc l'hélicoptère se rapproche de l'observateur situé au point O.

2. Grâce à la formule $\Delta f = f_0 \times \frac{v_{\text{hélico}}}{v_{\text{son}} - v_{\text{hélico}}}$ donnée dans l'énoncé, on obtient :

$$v_{\text{son}} - v_{\text{hélico}} = f_0 \times \frac{v_{\text{hélico}}}{\Delta f}$$

$$f_0 \times \frac{v_{\text{hélico}}}{\Delta f} + v_{\text{hélico}} = v_{\text{son}}$$

$$v_{\text{hélico}} \times \left(\frac{f_0}{\Delta f} + 1 \right) = v_{\text{son}}$$

$$v_{\text{hélico}} = \frac{v_{\text{son}}}{\frac{f_0}{\Delta f} + 1} = \frac{v_{\text{son}}}{\frac{f_0}{f' - f_0} + 1} = \frac{v_{\text{son}}}{\frac{f_0 + f' - f_0}{f' - f_0}}$$

$$v_{\text{hélico}} = \frac{v_{\text{son}} \times \left(\frac{v_{\text{son}}}{\lambda'} - \frac{v_{\text{son}}}{\lambda_0} \right)}{\frac{v_{\text{son}}}{\lambda'}} = \lambda' \times \left(\frac{v_{\text{son}}}{\lambda'} - \frac{v_{\text{son}}}{\lambda_0} \right)$$

$$v_{\text{hélico}} = v_{\text{son}} \times \left(1 - \frac{\lambda'}{\lambda_0} \right) = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \times \left(1 - \frac{0,33 \text{ m}}{0,49 \text{ m}} \right)$$

soit environ $1,1 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3.a. Le niveau d'intensité sonore à 10 m de l'hélicoptère est :

$$L_2 = 10 \log \left(\frac{I_2}{I_0} \right)$$

$$L_2 = 10 \log \left(\frac{1,2 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} \right) = 91 \text{ dB.}$$

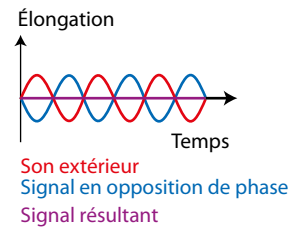
b. L'atténuation du son est :

$$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}}$$

$$A = 97 \text{ dB} - 91 \text{ dB} = 6 \text{ dB.}$$

4. Le phénomène d'interférences permet d'expliquer l'atténuation du niveau sonore dans le casque. Si les deux signaux sonores qui interfèrent au niveau du casque sont en opposition de phase alors l'amplitude du signal résultant est plus faible que celle des signaux interférant.

L'amplitude du signal résultant peut même être nulle si les amplitudes des signaux interférant sont égales :



5.a. Le phénomène de diffraction peut être pris en compte car l'ouverture de la porte est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du son émis par l'hélicoptère.

b. L'angle caractéristique θ est donné par la relation :

$$\sin \theta = \frac{\lambda_0}{a} ; \text{ d'où } \sin \theta = \frac{0,49 \text{ m}}{0,80 \text{ m}} \text{ soit } \theta = 38^\circ.$$

1 Évaluation des Compétences Expérimentales

p. 446

À propos du carbonate de sodium Na_2CO_3

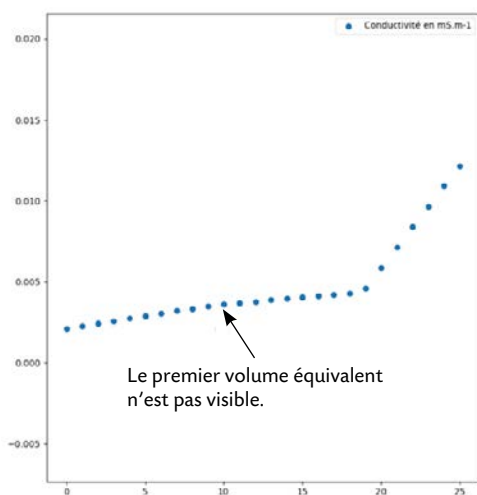
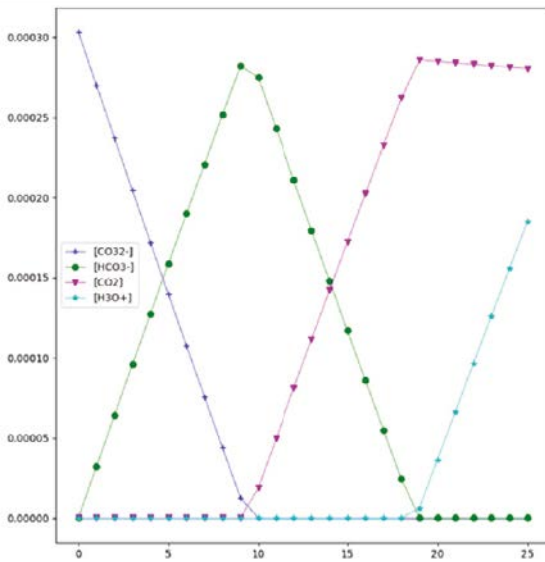
Ressource pour le professeur à télécharger :
Fichier Python

1. Au cours du titrage, le pH diminue, donc le diagramme de distribution est lu ici de la droite vers la gauche. Lorsque tous les ions carbonate CO_3^{2-} (aq) ont été totalement consommés, la quantité d'hydrogencarbonate HCO_3^- (aq) est maximale et la quantité de dioxyde de carbone CO_2 , H_2O (aq) est nulle. Les deux réactions de titrage (1) et (2) sont successives.

2. En faisant un tableau d'avancement, on en déduit les deux lignes à compléter :

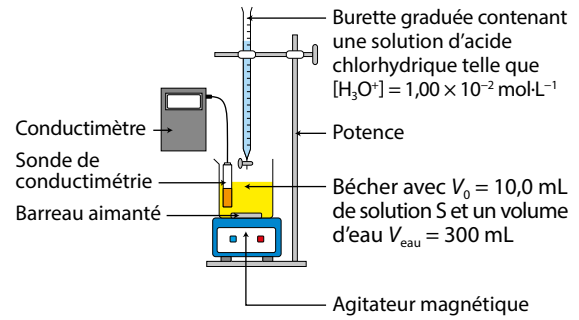
```
ccarbonate.append((c0*v0-ca*v)/(v0+veau+v))
cchlorure.append((ca*v)/(v0+veau+v))
```

3. Exécuter le programme.



Puisque l'on ne peut pas déterminer précisément le premier volume équivalent, il faut exploiter le deuxième volume équivalent. Les deux réactions étant successives et totales et sachant que la quantité d'ions hydrogencarbonate HCO_3^- (aq) formée par la première réaction est égale à la quantité initiale d'ions carbonate CO_3^{2-} (aq), on peut sommer les deux équations (1) et (2) et obtenir l'équation.

4.



5. On détermine $V_E = V_{E2} = 18,8 \text{ mL}$.

6. Les sources d'erreur possibles sont :

- le prélèvement du volume $V_0 = 10,0 \text{ mL}$ de solution S ;
- la détermination du volume V_E versé à l'équivalence ;
- l'incertitude sur la concentration de la solution titrante.

7. • À l'équivalence : $\frac{n_0(\text{CO}_3^{2-})}{1} = \frac{n_E(\text{H}_3\text{O}^+)}{2}$ donc :

$$\frac{n_0(\text{CO}_3^{2-})}{1} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times V_E}{2} \Rightarrow n_0(\text{CO}_3^{2-}) = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times V_E}{2}$$

Application numérique :

$$n_0(\text{CO}_3^{2-}) = \frac{1,00 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \times 18,8 \times 10^{-3} \text{ mL}}{2} = 9,40 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

• La quantité n de carbonate de sodium Na_2CO_3 (s) dans $V_0 = 10,0 \text{ mL}$ de solution S est égale à la quantité n_0 des ions carbonate CO_3^{2-} (aq).

• La masse m' de carbonate de sodium Na_2CO_3 (s) dans $V_0 = 10,0 \text{ mL}$ de solution S est égale à :

$$m' = n_0 \times M(\text{Na}_2\text{CO}_3)$$

$$m' = 9,40 \times 10^{-5} \times (23,0 \times 2 + 12,0 + 16,0 \times 3)$$

$$m' = 9,96 \times 10^{-3} \text{ g}$$

• La masse m de carbonate de sodium Na_2CO_3 (s) dans $V = 1 \text{ L}$ de solution S est égale à :

$$m = 100 \times m' = 9,96 \times 10^{-1} \text{ g}$$

• Le pourcentage en masse $P_m(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ de carbonate de sodium est donc égale à :

$$P_m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \frac{m'}{m_0} = \frac{9,96 \times 10^{-1} \text{ g}}{1,00 \text{ g}} = 99,6 \%$$

Le carbonate de sodium est alimentaire et peut jouer le rôle de poudre levante.

2 Évaluation des Compétences Expérimentales

Grossissement d'une lunette astronomique afocale

Remarque : pour ce sujet, nous avons utilisé les verres d'une paire de lunettes achetée en pharmacie. Le premier verre portait l'indication 1,5 δ (dioptries) et le deuxième 3 δ.

1. Pour évaluer la distance focale de ces deux lentilles convergentes, on peut réaliser l'image d'un tube fluorescent du plafond de la salle, image formée sur le sol par chaque lentille, et mesurer la distance entre la lentille et le sol.

– Pour la lentille de 1,5 δ, on trouve une distance focale d'environ 67 cm.

– Pour la lentille de 3 δ, on trouve une distance focale d'environ 33 cm.

2. Le schéma A montre que la distance focale de la lentille convergente correspondant à l'objectif est plus grande que celle de la lentille correspondant à l'oculaire. Par conséquent, on modélisera l'objectif par la lentille de 1,5 δ, c'est-à-dire de distance focale

$f'_1 = 67$ cm et l'oculaire par la lentille de 3 δ, c'est-à-dire de distance focale $f'_2 = 33$ cm.

3. et 4. Manipulation.

1. On place d'abord l'objet lumineux loin de l'objectif (à l'extrémité de la pailleuse, par exemple); on installe ensuite la lentille objectif sur le banc d'optique. On repère l'image de l'objet lointain à travers la lentille objectif. On utilise pour cela un écran mobile que l'on place perpendiculairement à l'axe optique et on le déplace jusqu'à obtenir le maximum de netteté.

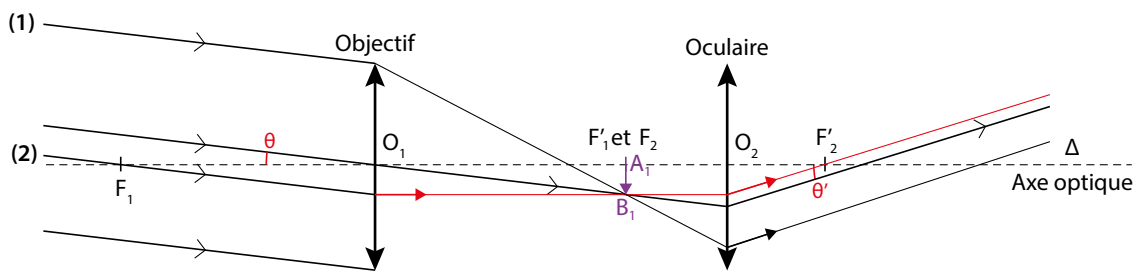
On mesure la taille de l'image intermédiaire A_1B_1 .

2. On enlève l'écran et on place la lentille oculaire sur l'axe optique de telle manière que le foyer image de la lentille objectif et le foyer objet de la lentille oculaire soient confondus. On réalise ainsi une lunette afocale.

Pour observer l'image, il faut placer l'œil derrière l'oculaire.

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------------|---|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre que la réalisation d'une lunette astronomique afocale dépend des deux lentilles convergentes objectif et oculaire et de leur position. | | | | |
| Analyser-Raisonner | – Placer l'objet lumineux à une distance éloignée de la lunette astronomique. – Identifier la lentille objectif et la lentille oculaire. – Trouver l'image intermédiaire A_1B_1 sur le banc d'optique. | | | | |
| Réaliser | – Placer l'objet lumineux à l'extrémité de la pailleuse loin de la lentille objectif. – Positionner correctement les lentilles convergentes objectif et oculaire sur le banc d'optique. – Mesurer A_1B_1 . – Observer l'image à travers la lunette astronomique afocale. | | | | |
| Valider | Vérifier que la distance lentille objectif-écran trouvée est environ égale à la distance focale de la lentille objectif (cf. objet à l'infini). | | | | |

5.



6. On a $\tan \theta = \frac{A_1B_1}{O_1A_1}$ mais A_1 est confondu avec F'_1 car l'image intermédiaire est dans le plan contenant le foyer image F'_1 et perpendiculaire à l'axe optique.

Donc $\tan \theta = \frac{A_1B_1}{f'_1}$; on calcule θ à partir de la mesure de la taille de l'image intermédiaire et de la distance focale de la lentille objectif.

On a également $\tan \theta' = \frac{A_1B_1}{O_2A_1}$ mais A_1 est confondu avec F_2 car on a réalisé une lunette afocale.

Donc : $\tan \theta' = \frac{A_1B_1}{f'_2}$ et l'on calcule θ' .

On en déduit le grossissement $G : G = \frac{\theta'}{\theta}$.

Par ailleurs, pour cette lunette astronomique afocale, on a :

$$\frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{O_1F'_1}{O_2F_2} = \frac{f'_1}{f'_2}$$

Si les angles sont petits, $\tan \theta = \theta$.

$$D'où : G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{f'_1}{f'_2}$$

$$G = \frac{f'_1}{f'_2} = \frac{67 \text{ cm}}{33 \text{ cm}} = 2,0.$$

On peut calculer le grossissement G par ces deux méthodes et confronter les résultats.

3 Évaluation des Compétences Expérimentales

En plein dans le mille

Ressource pour le professeur à télécharger : Vidéo « Projectile »

1. À l'aide de l'équation de la trajectoire du doc. A, exprimer la distance horizontale d parcourue par le projectile en fonction des conditions initiales, α et v_0 du tir.

Lorsque le projectile a parcouru la distance horizontale d , l'ordonnée y est nulle.

Donc : si $y = 0$, alors $-\frac{1}{2} \times \frac{g}{v_0^2 \times \cos^2 \alpha} \times x^2 + \tan \alpha \times x = 0$

soit $x \times \left(-\frac{1}{2} \times \frac{g}{v_0^2 \times \cos^2 \alpha} \times x + \tan \alpha \right) = 0$.

Deux solutions sont possibles :

$x = 0$ (origine) et $-\frac{1}{2} \times \frac{g}{v_0^2 \times \cos^2 \alpha} \times x + \tan \alpha = 0$

soit $x = \frac{\tan \alpha}{\frac{1}{2} \times \frac{g}{v_0^2 \times \cos^2 \alpha}}$

D'où $x = \frac{2 v_0^2 \times \cos^2 \alpha \times \tan \alpha}{g} = \frac{2 v_0^2 \times \cos^2 \alpha \times \sin \alpha}{g \times \cos \alpha}$

$x = \frac{2 v_0^2 \times \cos \alpha \times \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \times \sin 2\alpha}{g}$

(car $\sin 2\alpha = 2 \times \sin \alpha \times \cos \alpha$)

La distance horizontale d est :

$d = \frac{2 v_0^2 \times \cos \alpha \times \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \times \sin 2\alpha}{g}$.

2. Protocole expérimental permettant de déterminer l'équation de la trajectoire du centre de masse d'un projectile à partir du moment où il sort du canon :

1. On réalise la vidéo de la trajectoire du centre de masse du projectile en plaçant dans le champ une règle ou un repère qui sert d'étalon de distance (dans la vidéo ECE_2_lancer.avi, l'étalon de distance mesure 28 cm). Attention aux erreurs de parallaxe.

2. On utilise un logiciel de pointage vidéo et on cherche l'image que laquelle le projectile sort du canon.

3. On définit l'origine du repère à la sortie du canon et on indique un étalon de distance.

4. On pointe, image par image, la position du centre de masse du projectile.

5. On représente, à l'aide du tableau des données, y en fonction de x .

6. Avec la fonction « régression automatique » du logiciel, on détermine l'équation de la trajectoire du centre de masse du projectile. La trajectoire est une portion de parabole ; son équation est de la forme : $y = ax^2 + bx + c$.

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------------|--|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre que la détermination de l'équation de la trajectoire nécessite la mesure des coordonnées du centre de masse du projectile en fonction du temps. | | | | |
| Analyser-Raisonner | - Identifier les paramètres ayant une influence sur la trajectoire suivie par le système (angle de tir, valeur initiale de la vitesse). - Formuler des hypothèses sur l'influence de ces paramètres sur la distance d . | | | | |
| Réaliser | - Utiliser une webcam, un appareil photographique, une caméra... pour enregistrer le mouvement du centre de masse du projectile. - Définir l'origine du repère et indiquer l'étalon de distance. - Utiliser un logiciel de pointage pour positionner le centre de masse du projectile. - Représenter y en fonction de x . | | | | |
| Valider | Vérifier que la trajectoire est parabolique. | | | | |

3. a. On détermine les conditions initiales, α et v_0 du tir, à l'aide de la vidéo « projectile ». Voir la capture page suivante. L'équation théorique de la trajectoire du centre de masse du projectile est :

$y = -\frac{1}{2} \times \frac{g}{v_0^2 \times \cos^2 \alpha} \times x^2 + \tan \alpha \times x$.

Expérimentalement, on a :

$y = ax^2 + bx + c$ avec $\begin{cases} a = -0,61 \text{ m}^{-1} \\ b = 0,78 \\ c = -0,014 \text{ m} \end{cases}$.

c est assez proche de zéro comme prévu par l'équation théorique.

Par identification, on a :

• $\tan \alpha = 0,78$ soit $\alpha = 38^\circ$;

• $-\frac{1}{2} \times \frac{g}{v_0^2 \times \cos^2 \alpha} = a$ soit $2a \times v_0^2 \times \cos^2 \alpha = -g$.

D'où $v_0^2 = \frac{-g}{2a \times \cos^2 \alpha}$

soit $v_0 = \sqrt{\frac{-g}{2a \times \cos^2 \alpha}} = \sqrt{\frac{-9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{2 \times (-0,61 \text{ m}^{-1}) \times \cos^2(38^\circ)}}$

soit environ $3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. La distance horizontale d est :

$d = \frac{2v_0^2 \times \cos \alpha \times \sin \alpha}{g}$

$d = \frac{2 \times (3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \times \cos(38^\circ) \times \sin(38^\circ)}{9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$

$d = 1,3 \text{ m}$.

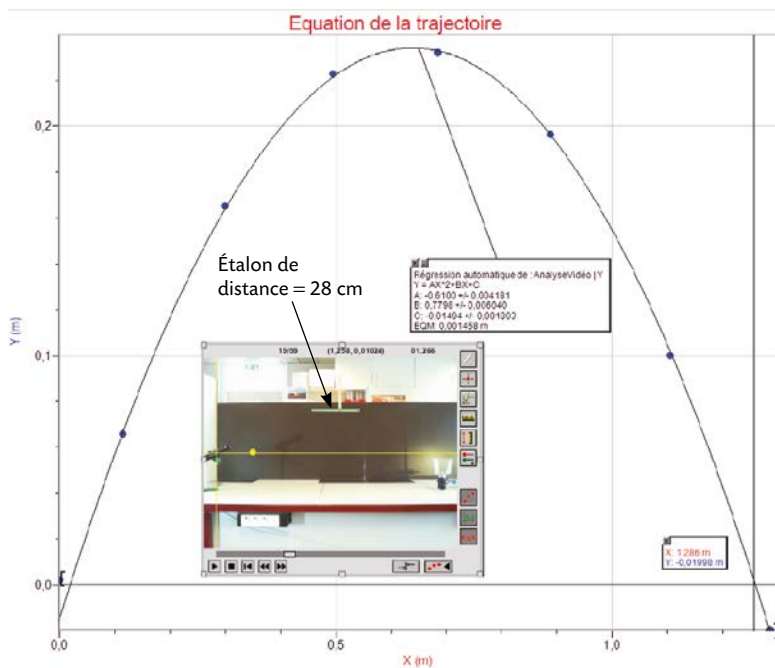
Expérimentalement, on obtient $d = 1,29 \text{ m}$.

Le résultat est cohérent.

4. Sources d'erreurs liées au protocole :

- le pointage du centre de masse du projectile ;
- l'indication de l'étalon de distance ;
- la modélisation mathématique de l'équation de la trajectoire à partir d'un logiciel ;
- la non prise en compte des actions de l'air sur le projectile.

5. Pour réaliser cette attraction sans danger, l'organisateur doit tenir compte de l'orientation du canon et de la valeur de la vitesse de sortie du projectile. En effet, la distance horizontale d varie en fonction de l'angle α et de la valeur de la vitesse v_0 du tir. Pour une petite salle, il faudra choisir un angle de tir nettement différent de 45° ou diminuer la valeur de la vitesse du lancer.



4 Évaluation des Compétences Expérimentales

p. 449

Les fentes d'Young

1. a. Protocole expérimental :

Matériel disponible :

- Banc d'optique.
- Diode laser $\lambda = 650 \text{ nm}$ ou 532 nm et un support.
- Fentes d'Young et un support.
- Écran.
- Un ordinateur.

- Webcam.
- Logiciel de traitement d'images.

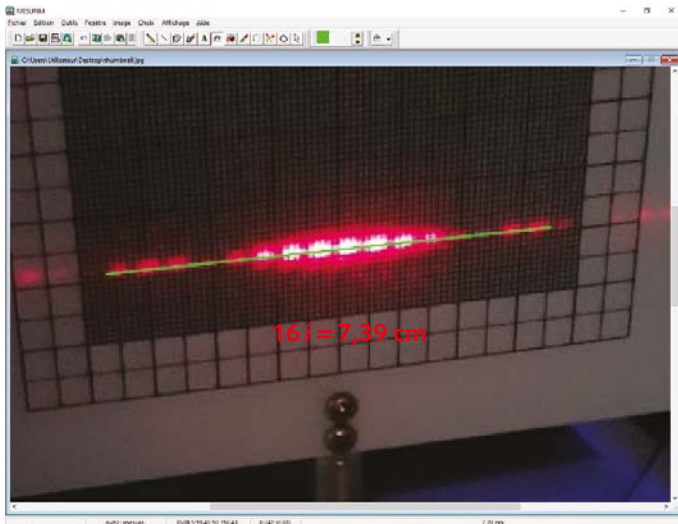
Protocole expérimental permettant de mesurer l'interfrange i :

1. On aligne la diode laser, les fentes d'Young et l'écran.
2. On positionne la webcam de manière à acquérir l'image de la figure d'interférences.
3. On détermine l'interfrange i en utilisant la capture d'écran de la figure d'interférences avec le logiciel de traitement d'images.

| Compétences | Capacités attendues | A | B | C | D |
|--------------------|--|---|---|---|---|
| S'approprier | Comprendre que la détermination de l'interfrange nécessite la réalisation d'une figure d'interférences lumineuses obtenue à l'aide de fentes d'Young. | | | | |
| Analyser-Raisonner | – Choisir de mesurer l'interfrange i à partir de la figure d'interférences et d'un logiciel de traitement d'images. – Utiliser un grand nombre de franges pour augmenter la précision de la mesure de i . | | | | |
| Réaliser | – Placer les fentes d'Young à une distance suffisamment grande de l'écran. – Placer correctement la caméra, par rapport à l'écran, pour faire une capture sans déformation de la figure d'interférences. – Mesurer l'interfrange en utilisant la figure et les outils du logiciel. | | | | |
| Valider | Conclure sur la mesure de l'interfrange i . | | | | |

b. Mise en œuvre du protocole.

À l'aide du logiciel *Mesurim*, on réalise une capture d'écran de la figure d'interférences.



Exemple de résultats obtenus pour $D = 205 \text{ cm}$ et $\lambda = 650 \text{ nm}$, on a $16 i = 7,39 \text{ cm}$.

Cela conduit à $i = \frac{7,39 \text{ cm}}{16} = 0,46 \text{ cm}$ ou $4,6 \text{ mm}$.

2. On détermine la distance b entre les deux fentes d'Young en faisant attention aux unités : $b = \frac{\lambda \times D}{i}$.

$$\text{Donc } b = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m} \times 205 \times 10^{-2} \text{ m}}{4,6 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2,9 \times 10^{-4} \text{ m}.$$

Elle correspond aux fentes d'Young de largeur $0,3 \text{ mm}$.

On peut comparer cette valeur expérimentale à celle indiquée sur les autres diapositives de la réserve de matériel.

3. a. Déterminer $u(b)$ et présenter le résultat sous la forme $b \pm u(b)$. On a : $\lambda = (650 \pm 1) \text{ nm}$.

Les incertitudes-types sur i et D peuvent être estimées en se basant sur le dernier chiffre significatif de leur mesure respective. $i = (4,6 \pm 0,1) \text{ mm}$; $D = (2,05 \pm 0,01) \text{ m}$.

L'incertitude-type sur la distance entre les deux fentes est :

$$u(b) = b \times \sqrt{\left(\frac{u(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}$$

$$u(b) = \frac{650 \times 10^{-9} \text{ m} \times 205 \times 10^{-2} \text{ m}}{4,6 \times 10^{-3} \text{ m}} \times \sqrt{\left(\frac{0,1 \text{ mm}}{4,6 \text{ mm}}\right)^2 + \left(\frac{1 \text{ nm}}{650 \text{ nm}}\right)^2 + \left(\frac{0,01 \text{ m}}{2,05 \text{ m}}\right)^2}$$

$$u(b) = 3 \times 10^{-5} \text{ m}.$$

La distance b entre les deux fentes d'Young est :

$$b = (2,9 \pm 0,3) \times 10^{-4} \text{ m}.$$

b. La formule de l'incertitude-type montre que la source d'erreur prenant ici le plus de poids est la mesure de l'interfrange i . Ainsi, on cherchera en priorité à améliorer la qualité de cette mesure en :

– augmentant D (ce qui augmente i donc réduira l'incertitude-type relative sur i) ;

– plaçant la webcam derrière un écran translucide pour qu'elle soit bien en face de la figure d'interférences.

1 Exercice de synthèse

Performances sportives et sciences

Partie I

1. À la fin de la phase d'élan, le mouvement du boulet est circulaire et uniforme. La trajectoire du boulet est un cercle de rayon R parcouru à la vitesse v_0 constante. Dans le repère de Frenet, l'accélération du boulet, modélisé par un point matériel M , s'écrit :

$$\vec{a} = \frac{v_0^2}{R} \vec{u}_n + \frac{dv_0}{dt} \vec{u}_t.$$

Comme la vitesse v_0 est constante : $\frac{dv_0}{dt} = 0$.

L'accélération est donc $\vec{a} = \frac{v_0^2}{R} \vec{u}_n$, orientée vers le centre du cercle.

Sa valeur est $a = \frac{v_0^2}{R}$ soit :

$$a = \frac{(26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{2,2 \text{ m}} = 307 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 3,1 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

2. La deuxième loi de Newton, appliquée au boulet de masse m constante dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen, s'écrit : $\sum \vec{F} = \vec{P} + \vec{F} = m\vec{a}$ avec \vec{P} le poids du boulet et \vec{F} la force exercée par le câble sur le boulet.

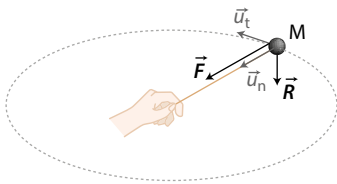
Le vecteur somme des forces $\sum \vec{F}$ a même direction et même sens que le vecteur accélération :

$$\sum F = 4,0 \text{ kg} \times 307 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 1\,128 \text{ N} \approx 1,1 \times 10^3 \text{ N}.$$

Le poids du boulet a pour valeur $P = m \times g$

$$\text{soit } P = 4,0 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 39 \text{ N}.$$

La valeur du poids du boulet est donc négligeable devant celle de $\sum F$ et donc devant la valeur de F .

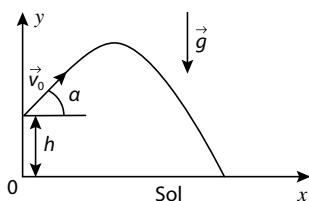


3. On étudie le système {boulet}, de masse m constante, dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Les actions dues à l'air étant négligées, le boulet n'est soumis qu'à son poids, $\vec{P} = m\vec{g}$.

La deuxième loi de Newton appliquée au boulet donne :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \text{ soit } \vec{P} = m\vec{a} \text{ donc } m\vec{g} = m\vec{a} \text{ d'où : } \vec{a} = \vec{g}.$$

En projection dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) , il vient : $\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$.



$$\text{On a : } \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ soit } \vec{a} \begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0 \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} = -g \end{cases}$$

$$\text{donc } \vec{v} \begin{cases} v_x = C_1 \\ v_y = -g \times t + C_2 \end{cases}$$

où C_1 et C_2 sont des constantes d'intégration qui dépendent des conditions initiales.

$$\text{Or } \vec{v}(t=0) = \vec{v}_0 \text{ avec } \vec{v}_0 \begin{cases} v_{0,x} = v_0 \times \cos \alpha \\ v_{0,y} = v_0 \times \sin \alpha \end{cases},$$

$$\text{donc } \begin{cases} C_1 = v_0 \times \cos \alpha \\ 0 + C_2 = v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

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

$$\text{Et : } \vec{v} = \frac{d\overline{OM}}{dt} \text{ soit } \vec{v} \begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_0 \times \cos \alpha \\ \frac{dy}{dt} = -g \times t + v_0 \times \sin \alpha \end{cases}$$

$$\text{donc } \overline{OM} \begin{cases} x(t) = (v_0 \times \cos \alpha) \times t + C'_1 \\ y(t) = -\frac{1}{2} g \times t^2 + (v_0 \times \sin \alpha) \times t + C'_2 \end{cases}$$

où C'_1 et C'_2 sont des constantes d'intégration qui dépendent des conditions initiales.

$$\text{Or } \overline{OM}(t=0) \begin{cases} x = 0 \\ y = h \end{cases}, \text{ donc } \begin{cases} 0 + C'_1 = 0 \\ 0 + 0 + C'_2 = h \end{cases}$$

$$\text{Finalement : } \overline{OM} \begin{cases} x(t) = (v_0 \times \cos \alpha) \times t \\ y(t) = -\frac{1}{2} g \times t^2 + (v_0 \times \sin \alpha) \times t + h \end{cases}$$

On isole le temps t de l'équation sur x : $t = \frac{x}{v_0 \times \cos \alpha}$ et on reporte dans l'équation $y(t)$:

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

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

4. Il faut déterminer l'abscisse du boulet lorsqu'il touche le sol, soit résoudre : $y = \frac{-g \times x^2}{2v_0^2 \times \cos^2(\alpha)} + \tan(\alpha) \times x + h = 0$ avec $\alpha = 45^\circ$,

$$v_0 = 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, h = 3,0 \text{ m}, g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Donc résoudre :

$$\frac{-9,8x^2}{2 \times 26^2 \times \cos^2(45)} + \tan(45) \times x + 3,0 = -1,449\,704\,142 \times 10^{-2} x^2 + x + 3,0 = 0.$$

Polynôme du second degré du type $ax^2 + bx + c = 0$:

$$\Delta = b^2 - 4ac = 1^2 - (4 \times (-1,449\,704\,142 \times 10^{-2}) \times 3,0)$$

$$\Delta = 1,17396 \text{ (valeur non arrondie stockée en mémoire)}$$

$$x_1 = \frac{-1 + \sqrt{1,17}}{2 \times (-1,4497 \times 10^{-2})} = -2,9 \text{ m}$$

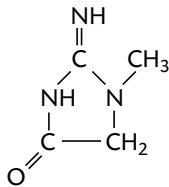
$$\text{et } x_2 = \frac{-1 - \sqrt{1,17}}{2 \times (-1,4497 \times 10^{-2})} = 71,86 \text{ m}.$$

On ne retient que la solution positive, et avec deux chiffres significatifs $x_2 = 72 \text{ m}$.

Comme $x_2 < 82,98 \text{ m}$, le record du monde féminin n'est pas battu lors de ce lancer.

Partie II

5. La formule semi-développée de la créatinine est :



Sa formule brute est donc : $C_4H_7N_3O$.

Sa masse molaire moléculaire est :

$$M(C_4H_7N_3O) = 4M(C) + 7M(H) + 3M(N) + M(O)$$

$$M(C_4H_7N_3O) = 113,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

6. Créatine : groupe carboxyle associé à la famille fonctionnelle acide carboxylique.

Créatinine : groupe amide associé à la famille fonctionnelle amide.

7. Le tube 1 sert à faire le « blanc », donc son absorbance est : $A = 0$.

Le tube 2 contient de la créatinine à une concentration C_2 inconnue et a une absorbance $A_2 = 0,71$.

Le tube 3 contient de la créatinine à la concentration $C_3 = 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pour une absorbance de $A_3 = 0,62$.

Comme l'énoncé indique que « L'intensité de la couleur obtenue est directement proportionnelle à la concentration de créatinine de l'échantillon. », $A = k \times C$

$$\text{donc } k = \frac{A}{C} = \frac{A_2}{C_2} = \frac{A_3}{C_3} \text{ soit :}$$

$$C_2 = \frac{A_2 \times C_3}{A_3}$$

$$C_2 = \frac{0,71 \times 100}{0,62} = 1,1 \times 10^2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$C_2 = 1,1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ (valeur stockée en mémoire).}$$

La concentration en masse t_2 est liée à la concentration C_2 par la relation $t_2 = C_2 \times M(\text{créatinine})$.

$$t_2 = C_2 \times M(C_4H_7N_3O)$$

$t_2 = 1,1 \times 10^{-4} \times 113 = 1,3 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ si on conserve trois chiffres significatifs $t_2 = 12,9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Cette valeur est légèrement supérieure à celle attendue pour le sérum sanguin chez la femme car elle est supérieure à $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

8. La valeur du taux de créatinine dans le sang dépend de la masse musculaire de l'individu.

Comme il s'agit d'une athlète de forte masse musculaire, ce taux est plus élevé que celui d'une femme moins sportive.

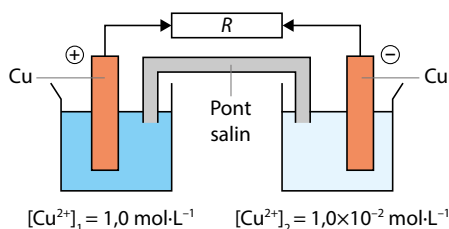
2 Exercice de synthèse

p. 451

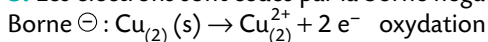
Autour du cuivre

Partie I

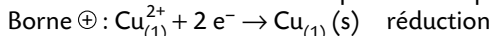
1. a. Le sens conventionnel du courant circule de la borne positive vers la borne négative de la pile. Les électrons circulent dans le sens opposé.



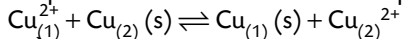
b. Les électrons sont cédés par la borne négative de pile :



Les électrons sont consommés par la borne positive de pile :



L'équation de fonctionnement de la pile est :

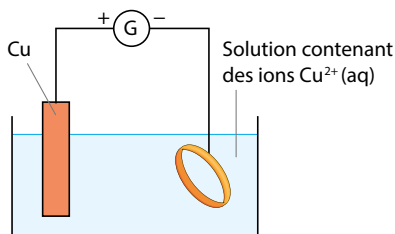


c. À l'équilibre, $Q_{r, \text{éq}} = K$ et la pile cesse de fonctionner.

$$\text{On a donc : } \frac{[\text{Cu}_{(2)}^{2+}]_{2, \text{éq}}}{[\text{Cu}_{(2)}^{2+}]_{1, \text{éq}}} = 1 \text{ soit } [\text{Cu}_{(1)}^{2+}]_{\text{éq}} = [\text{Cu}_{(2)}^{2+}]_{\text{éq}}$$

Erratum : erreur dans le spécimen corrigée dans le manuel de l'élève : dans l'énoncé de la question 1. c., il manque la fin de la phrase : « sachant que la constante d'équilibre vaut $K = 1,0$ ».

2. a. Pour déposer du cuivre solide sur la bague selon $\text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$, il faut que celle-ci soit reliée à la borne du générateur qui délivre les électrons c'est-à-dire à sa borne négative.



$$\text{b. } I = \frac{Q}{\Delta t} \Leftrightarrow Q = I \times \Delta t$$

$$\text{soit } Q = 400 \times 10^{-3} \times 3\,600 = 1,44 \times 10^3 \text{ C}$$

$$n(\text{e}^-) = \frac{Q}{N \times e}$$

$$\text{soit } n(\text{e}^-) = \frac{1,44 \times 10^3}{6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19}} = 1,5 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

$$n(\text{Cu}^{2+}) = \frac{1}{2} \times n(\text{e}^-)$$

$$\text{et } n_{\text{déposé}}(\text{Cu}) = n(\text{Cu}^{2+}) \Rightarrow n_{\text{déposé}}(\text{Cu}) = \frac{1}{2} \times n(\text{e}^-)$$

$$\text{soit } n_{\text{déposé}}(\text{Cu}) = \frac{1}{2} \times 1,5 \times 10^{-2} = 7,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$m_{\text{déposé}}(\text{Cu}) = n_{\text{déposé}}(\text{Cu}) \times M(\text{Cu})$$

$$\text{soit } m_{\text{déposé}}(\text{Cu}) = 7,5 \times 10^{-3} \times 63,5 = 4,8 \times 10^{-1} \text{ g}$$

Partie II

3. Le spectre d'émission de la molécule CuCl appartient au domaine du rayonnement **visible** car les longueurs d'ondes sont comprises entre 395 nm et 525 nm et le domaine des radiations visibles est compris entre 400 nm et 800 nm environ.

4. À 20 m, $I = 0,63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

$$\text{donc } L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{0,63}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 118 \text{ dB}$$

$$5. \text{ D'après l'énoncé : } L_2 = L_1 + 20 \log \left(\frac{d_1}{d_2} \right)$$

La valeur de d_2 , la distance entre l'artificier A et le point d'éclatement E est obtenue en appliquant le théorème de Pythagore :

$$d_2^2 = H^2 + \ell^2 \Leftrightarrow d_2 = \sqrt{H^2 + \ell^2} \text{ donc } d_2 = \sqrt{70^2 + 95^2} = 118 \text{ m}$$

Comme à $d_1 = 20 \text{ m}$ du point d'éclatement E : $L_1 = 118 \text{ dB}$, on peut écrire :

$$L_2 = 118 + 20 \times \log \left(\frac{20}{118} \right) = 103 \text{ dB}$$

Ce niveau d'intensité sonore est « difficilement supportable » d'après le document fourni : l'artificier doit utiliser un dispositif de protection auditive.

6. L'atténuation géométrique du son est : $A = 118 - 103 = 15 \text{ dB}$.