Corrigé complet — Bac 2022 Centres étrangers 1 Jour 2

Physique-chimie, enseignement de spécialité **20 points** **3 h 30**

Ex 1	**L'acide formique** Réactions acide-base · Titrage pH-métrique · Dilution et titre massique · Synthèse d'un ester et rendement · Déplacement d'équilibre · Spectroscopie infrarouge	10 pts	1 h 45	21 questions	p. 2
Ex 2	**Détermination du diamètre de Jupiter** Lunette astronomique afocale · Grossissement · Diamètre apparent · Image intermédiaire · Approximation des petits angles	5 pts	53 min	10 questions	p. 9
Ex 3	**Mesure de la masse de Jupiter et du Soleil** Troisième loi de Kepler · Force de gravitation · Deuxième loi de Newton · Repère de Frenet · Mouvement circulaire uniforme · Exploitation d'une modélisation linéaire	5 pts	53 min	7 questions	p. 13
Ex 4	**Capacité thermique massique du cuivre** Premier principe de la thermodynamique · Flux thermique · Loi phénoménologique de Newton · Équation différentielle du premier ordre · Temps caractéristique · Calorimétrie	5 pts	53 min	10 questions	p. 16

Comment s'en servir. Fais d'abord le sujet en temps limité, puis corrige-toi exercice par exercice. À gauche de chaque question, sur les carreaux : ce qu'il faut écrire sur ta copie. À droite : les pièges, ce qu'il faut comprendre et les méthodes.

L'acide formique

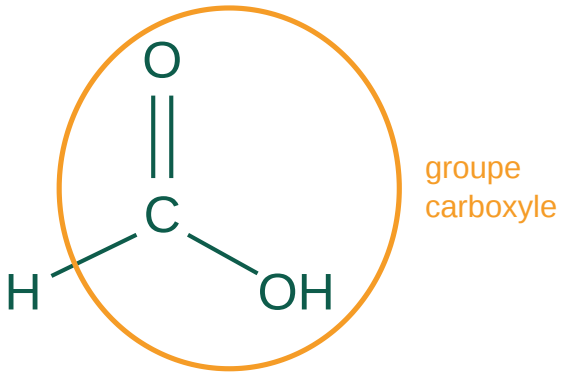
Bac 2022 Centres étrangers 1 Jour 2 · Exercice 1 **10 points** **Durée conseillée 1 h 45**

1 Recopier la formule semi-développée de l'acide formique et entourer le groupe caractéristique justifiant le terme « acide ».

Le groupe entouré est le groupe carboxyle $-\mathrm{COOH}$: il caractérise la famille des acides carboxyliques.

Groupe carboxyle $-\mathrm{COOH}$ entouré sur la formule.

PIÈGE
N'entourer que $-\mathrm{OH}$: ce serait le groupe hydroxyle d'un alcool. Le groupe carboxyle comprend aussi l'atome de carbone et l'oxygène doublement lié.



1 · Acide formique : groupe carboxyle entouré

2 Justifier que l'acide formique se nomme acide méthanoïque dans la nomenclature officielle.

La molécule ne possède qu'un seul atome de carbone : le préfixe est « méth- ».

Elle porte un groupe carboxyle : le nom s'écrit « acide …oïque ».

Un atome de carbone et un groupe carboxyle : acide méthanoïque.

3 Écrire l'équation de dissolution du carbonate de sodium dans l'eau.

$$\mathrm{Na_2CO_3\,(s) \longrightarrow 2\,Na^+\,(aq) + {CO_3}^{2-}\,(aq)}$$

PIÈGE
Oublier le coefficient 2 devant $\mathrm{Na^+}$: l'équation doit conserver les éléments et la charge (ici $2 \times (+1) + (-2) = 0$).

4 Écrire une équation de réaction qui met en évidence le rôle de l'ion carbonate lors de l'utilisation de ce remède. Préciser ce rôle.

Données utiles couples $\mathrm{{HCO_3}^-/{CO_3}^{2-}}$ et $\mathrm{HCOOH/HCOO^-}$

L'ion carbonate est la base du couple $\mathrm{{HCO_3}^-/{CO_3}^{2-}}$; il réagit avec l'acide formique :

$$\mathrm{HCOOH\,(aq) + {CO_3}^{2-}\,(aq) \longrightarrow HCOO^-\,(aq) + {HCO_3}^-\,(aq)}$$

L'ion carbonate joue le rôle de base : il capte l'ion $\mathrm{H^+}$ cédé par l'acide formique, qui est ainsi consommé.

MÉTHODE
Réaction acide-base : l'acide d'un couple cède un ion $\mathrm{H^+}$ à la base de l'autre couple. Écrire les deux demi-équations, puis les additionner.

5 Montrer que, si l'indication « 65 % » est exacte, la concentration en acide formique de la solution commerciale vaut $C_0 = 16{,}3\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Données utiles $d = 1{,}15$; $\rho_{\text{eau}} = 1\ \text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$; $M = 46{,}0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; pourcentage massique $w = 0{,}65$

Pour un volume $V = 1{,}000\ \text{L} = 1000\ \text{mL}$ de solution S_0 :

- masse de solution : $m_S = d\,\rho_{\text{eau}}\,V = 1{,}15 \times 1 \times 1000 = 1{,}15 \times 10^3\ \text{g}$;
- masse d'acide : $m = w\,m_S = 0{,}65 \times 1{,}15 \times 10^3 = 747{,}5\ \text{g}$;
- quantité d'acide : $n = \dfrac{m}{M} = \dfrac{747{,}5}{46{,}0} = 16{,}25\ \text{mol}$.

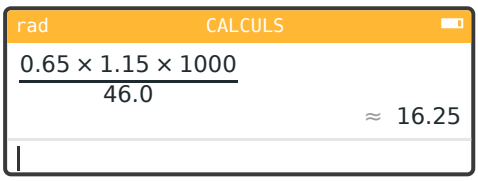
$$C_0 = \frac{n}{V} = \frac{w\,d\,\rho_{\text{eau}}}{M} = \frac{16{,}25}{1{,}000}$$

$C_0 = 16{,}25 \approx 16{,}3\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$: c'est la valeur attendue.

PIÈGE
Diviser la masse d'acide par la masse de solution, ou garder ρ en $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ avec un volume en litres : convertir 1 L en 1000 mL avant de multiplier.

COMPRENDRE
Chiffres significatifs : d et M en ont trois, on arrondit donc le résultat final à trois chiffres, sans arrondir les valeurs intermédiaires.

À LA CALCULATRICE



6 Citer deux règles de sécurité à respecter lors de l'utilisation de cette solution commerciale.

Le pictogramme indique une solution corrosive (brûlures de la peau et des yeux).

Porter des gants et des lunettes de protection (ainsi qu'une blouse) ; manipuler sous hotte.

7 Écrire la réaction support du dosage.

Données utiles couples $\text{HCOOH}/\text{HCOO}^-$ et $\text{H}_2\text{O}/\text{HO}^-$

Espèce titrée : HCOOH ; espèce titrante : HO^-.

$$\text{HCOOH (aq)} + \text{HO}^- \text{(aq)} \longrightarrow \text{HCOO}^- \text{(aq)} + \text{H}_2\text{O (l)}$$

PIÈGE
Faire figurer Na^+ dans l'équation : c'est un ion spectateur. La réaction de titrage est totale, elle s'écrit avec une flèche simple.

8 Définir l'équivalence et en déduire le volume $V_{B0\text{éq}}$ qu'il faudrait verser pour doser $V_A = 10$ mL de solution commerciale S_0. Commenter la valeur obtenue.

Données utiles $C_0 = 16{,}3\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Q5) ; $C_B = 1{,}00 \times 10^{-1}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; $V_A = 10\ \text{mL}$

À l'équivalence, les réactifs titré et titrant ont été introduits dans les proportions stœchiométriques : ils sont tous deux entièrement consommés.

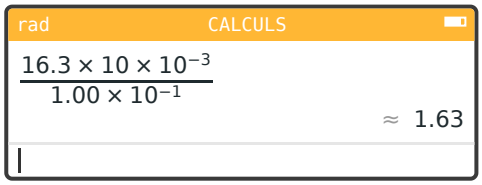
D'après l'équation (Q7) : $n(\text{HCOOH})_{\text{titré}} = n(\text{HO}^-)_{\text{versé}}$, soit $C_0\,V_A = C_B\,V_{B0\text{éq}}$.

$$V_{B0\text{éq}} = \frac{C_0\,V_A}{C_B} = \frac{16{,}3 \times 10 \times 10^{-3}}{1{,}00 \times 10^{-1}} = 1{,}6\ \text{L}$$

Ce volume est très supérieur à la contenance d'une burette (25 mL) : le titrage direct de S_0 est irréalisable, il faut d'abord diluer la solution.

$V_{B0\text{éq}} = 1{,}6$ L : beaucoup trop grand pour une burette de 25 mL.

À LA CALCULATRICE



9 Montrer qu'une dilution au centième de S_0 permet de doser $V_A = 10{,}0$ mL de la solution diluée S_1 avec un volume équivalent $V_{B1éq}$ compris entre 15 mL et 20 mL.

Données utiles $C_0 = 16{,}3\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Q5) ; $C_B = 1{,}00\times10^{-1}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; $V_A = 10{,}0$ mL

Après dilution : $C_1 = \dfrac{C_0}{100} = 0{,}163\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

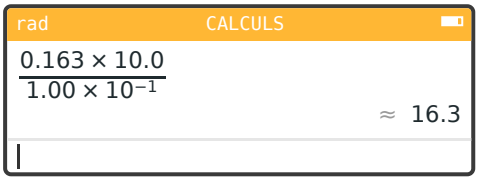
À l'équivalence : $C_1\,V_A = C_B\,V_{B1éq}$, donc

$$V_{B1éq} = \frac{C_1\,V_A}{C_B} = \frac{0{,}163\times10{,}0}{1{,}00\times10^{-1}} = 16{,}3\ \text{mL}$$

$V_{B1éq} = 16{,}3$ mL, bien compris entre 15 mL et 20 mL.

MÉTHODE
Dans $V_{Béq} = C_1V_A/C_B$, le rapport des concentrations est sans unité : on peut laisser V_A en mL, le résultat sort en mL.

À LA CALCULATRICE

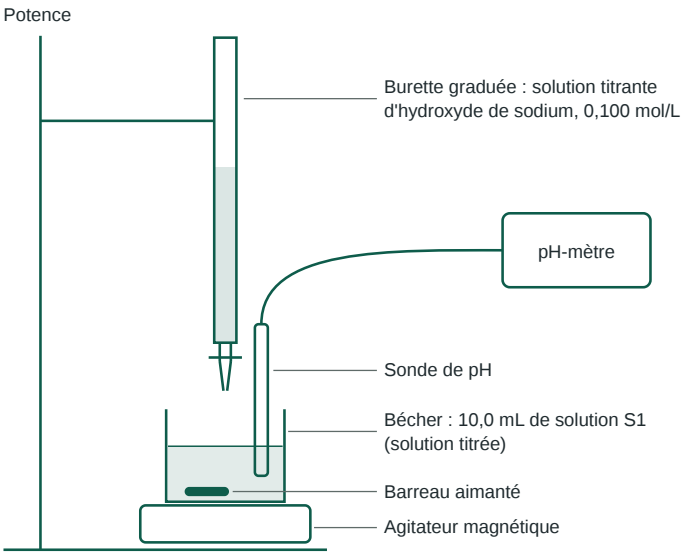


10 Faire un schéma annoté du dispositif utilisé pour réaliser ce titrage.

Le schéma doit montrer et nommer : la burette graduée contenant la solution titrante, le bécher contenant la solution titrée, l'agitateur magnétique et son barreau aimanté, le pH-mètre et sa sonde plongeant dans la solution.

Schéma annoté ci-dessous.

PIÈGE
Des légendes incomplètes : il faut écrire le nom de la verrerie et aussi son contenu (nom de la solution, concentration ou volume).



10 · Dispositif de titrage pH-métrique

11 À l'aide de la courbe $\mathrm{pH} = f(V_B)$, déterminer si la solution S_0 est bien une solution à 65 %. Commenter l'écart éventuel avec cette valeur.

Données utiles $C_B = 1{,}00 \times 10^{-1}\ \mathrm{mol \cdot L^{-1}}$; $V_A = 10{,}0\ \mathrm{mL}$; $M = 46{,}0\ \mathrm{g \cdot mol^{-1}}$; masse de 1 L de S_0 : $1{,}15 \times 10^3$ g (Q5)

Par la méthode des tangentes parallèles, on lit sur l'annexe : $V_E = 16{,}0$ mL.

À l'équivalence : $C_1 = \dfrac{C_B\,V_E}{V_A} = \dfrac{1{,}00 \times 10^{-1} \times 16{,}0}{10{,}0} = 0{,}160\ \mathrm{mol \cdot L^{-1}}$, donc $C_0 = 100\,C_1 = 16{,}0\ \mathrm{mol \cdot L^{-1}}$.

Un litre de S_0 contient $m = C_0\,M = 16{,}0 \times 46{,}0 = 736$ g d'acide pour $1{,}15 \times 10^3$ g de solution :

$$w = \frac{736}{1{,}15 \times 10^3} = 0{,}640$$

Écart relatif avec l'étiquette : $\dfrac{65 - 64{,}0}{65} \approx 1{,}5\ \%$. Il est faible et s'explique par les incertitudes de l'expérience : lecture graphique de V_E, dilution au centième, prélèvement de V_A, concentration C_B.

Pourcentage massique mesuré : 64 %. L'indication « 65 % » est vérifiée, aux incertitudes de mesure près.

PIÈGE
Oublier le facteur 100 de la dilution : la courbe donne C_1, pas C_0.

MÉTHODE
Tangentes parallèles : tracer deux tangentes parallèles de part et d'autre du saut de pH, puis la parallèle équidistante. Elle coupe la courbe au point d'équivalence, dont on lit l'abscisse V_E.

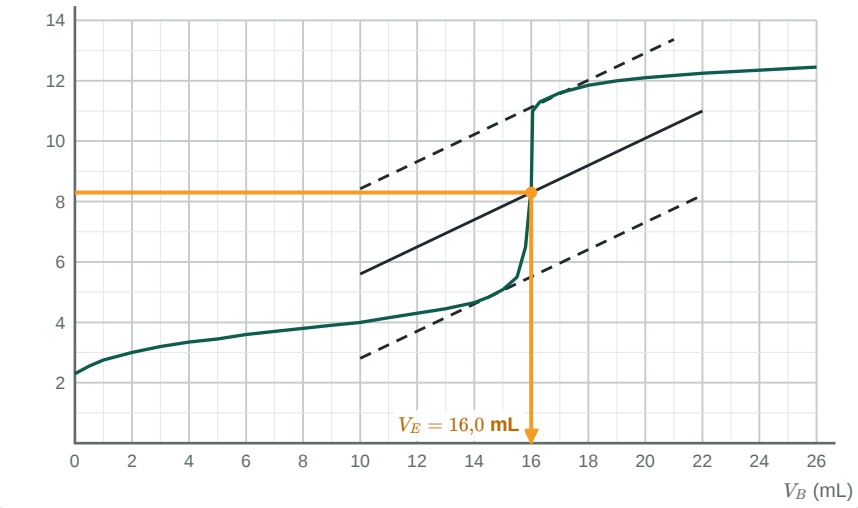
À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{1.00 \times 10^{-1} \times 16.0}{10.0} \times 100$ ≈ 16

$\dfrac{16.0 \times 46.0}{1.15 \times 10^3}$ ≈ 0.64

$\dfrac{65 - 64.0}{65}$ ≈ 0.01538462



11 · Annexe complétée : méthode des tangentes parallèles

12 Indiquer le rôle d'un catalyseur comme l'acide sulfurique dans cette synthèse.

Le catalyseur accélère la réaction (il réduit sa durée) sans figurer dans l'équation : il est régénéré et ne modifie pas l'état final.

13 Donner une raison pour laquelle il est nécessaire de chauffer lors de cette synthèse.

La température est un facteur cinétique.

Chauffer accélère la transformation, qui serait très lente à température ambiante.

COMPRENDRE
Autre raison recevable : le chauffage vaporise l'ester ($\theta_{éb} = 54{,}5\ ^\circ\mathrm{C}$), ce qui permet de le séparer du mélange par distillation.

14 Montrer que les quantités initiales de réactifs sont $n_{i,\text{acide formique}} = 0{,}53$ mol et $n_{i,\text{éthanol}} = 0{,}35$ mol.

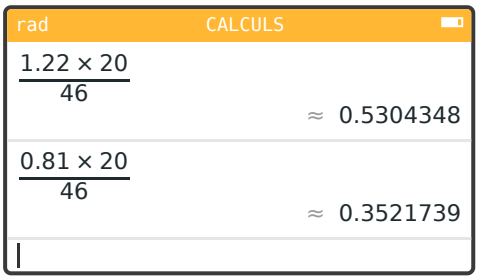
Données utiles acide formique : $\rho = 1{,}22\ \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, $M = 46\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; éthanol : $\rho = 0{,}81\ \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, $M = 46\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $V = 20$ mL chacun

Pour un liquide pur : $n = \dfrac{m}{M} = \dfrac{\rho V}{M}$.

$n_{i,\text{acide formique}} = \dfrac{1{,}22 \times 20}{46} = 0{,}53$ mol $\qquad n_{i,\text{éthanol}} = \dfrac{0{,}81 \times 20}{46} = 0{,}35$ mol

$n_{i,\text{acide formique}} = 0{,}53$ mol et $n_{i,\text{éthanol}} = 0{,}35$ mol : valeurs attendues.

À LA CALCULATRICE



15 Expliquer l'intérêt d'utiliser un réactif en excès pour la synthèse du formiate d'éthyle.

La transformation est limitée (double flèche dans le schéma de synthèse) : elle conduit à un équilibre.

Un excès d'un réactif déplace l'équilibre dans le sens direct : le réactif limitant est davantage consommé, le rendement augmente.

16 Indiquer la quantité de matière maximale de formiate d'éthyle formée si on suppose que la réaction est totale.

Données utiles $n_{i,\text{acide formique}} = 0{,}53$ mol ; $n_{i,\text{éthanol}} = 0{,}35$ mol (Q14)

Les réactifs réagissent mole à mole et $0{,}35 < 0{,}53$: l'éthanol est le réactif limitant. Une mole d'éthanol consommée donne une mole d'ester.

$n_{\text{max}} = n_{i,\text{éthanol}} = 0{,}35$ mol

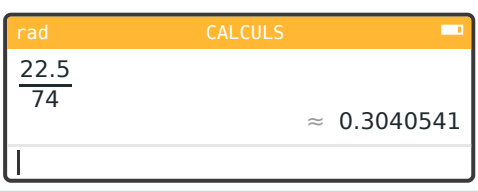
17 En déduire la quantité de matière d'ester obtenue.

Données utiles $m = 22{,}5$ g ; $M(\text{ester}) = 74\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$n_{\text{exp}} = \frac{m}{M} = \frac{22{,}5}{74}$$

$n_{\text{exp}} = 0{,}30$ mol

À LA CALCULATRICE



18 Exprimer puis calculer le rendement r de cette synthèse.

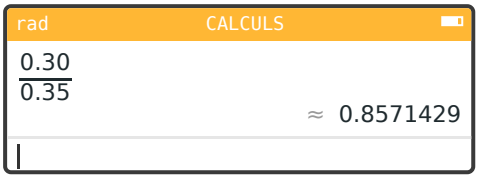
Données utiles $n_{exp} = 0{,}30$ mol (Q17) ; $n_{max} = 0{,}35$ mol (Q16)

$$r = \frac{n_{exp}}{n_{max}} = \frac{0{,}30}{0{,}35}$$

$r = 0{,}86$, soit 86 %

PIÈGE
Diviser par la quantité du réactif en excès (0,53 mol) : la quantité maximale de produit est fixée par le réactif limitant.

À LA CALCULATRICE



19 Justifier l'intérêt du montage utilisé pour favoriser le rendement de la synthèse.

Données utiles températures d'ébullition : ester 54,5 °C ; éthanol 78,0 °C ; eau 100,0 °C ; acide formique 100,7 °C ; en tête de colonne $\theta = 55\ ^\circ\text{C}$

Le montage est une distillation. L'ester est l'espèce la plus volatile du mélange : c'est lui qui passe en tête de colonne ($\theta = 55\ ^\circ\text{C}$, voisin de 54,5 °C) et qui est recueilli dans le distillat.

L'ester est retiré du ballon au fur et à mesure de sa formation : la réaction inverse ne peut plus se faire, l'équilibre est déplacé dans le sens direct et le rendement augmente.

20 Déterminer la masse volumique du distillat et émettre une hypothèse sur sa pureté.

Données utiles $m = 22{,}5$ g ; $V = 25{,}1$ mL ; $\rho(\text{ester}) = 0{,}92\ \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$; $\rho(\text{éthanol}) = 0{,}81\ \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$

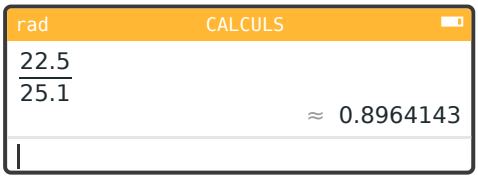
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{22{,}5}{25{,}1} = 0{,}896\ \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$$

Cette valeur est un peu inférieure à celle de l'ester pur ($0{,}92\ \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$).

$\rho = 0{,}896\ \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$: hypothèse, le distillat n'est pas pur ; il contiendrait une espèce moins dense que l'ester, l'éthanol.

COMPRENDRE
L'éthanol est la seule espèce du mélange moins dense que l'ester, et la plus volatile après lui (78,0 °C) : c'est l'impureté la plus plausible.

À LA CALCULATRICE



21 À partir du spectre IR, dire si l'hypothèse de la question 20 est confirmée ou infirmée et préciser si la valeur du rendement de la question 18 doit être revue.

Données utiles $\mathrm{C{=}O}$: 1700-1800 $\mathrm{cm^{-1}}$; $\mathrm{C{-}H}$: 2800-3000 $\mathrm{cm^{-1}}$; $\mathrm{O{-}H}$ alcool : 3200-3700 $\mathrm{cm^{-1}}$, bande forte et large

Le formiate d'éthyle ne possède pas de liaison $\mathrm{O{-}H}$: son spectre ne devrait montrer que la bande $\mathrm{C{=}O}$ (ici vers 1700 $\mathrm{cm^{-1}}$) et les bandes $\mathrm{C{-}H}$ (vers 2990 $\mathrm{cm^{-1}}$).

Or le spectre présente en plus une bande forte et large entre 3200 et 3700 $\mathrm{cm^{-1}}$, caractéristique de la liaison $\mathrm{O{-}H}$ d'un alcool : le distillat contient de l'éthanol.

La masse de 22,5 g n'est donc pas celle de l'ester seul : la quantité d'ester réellement obtenue est inférieure à 0,30 mol.

Hypothèse confirmée : le distillat est impur. Le rendement réel est inférieur à 86 %, la valeur de la question 18 est surestimée.

COMPRENDRE

Sur le spectre, le pic $\mathrm{C{=}O}$ est pointé à 1695 $\mathrm{cm^{-1}}$, juste sous l'intervalle 1700-1800 du tableau : les bornes des tables sont indicatives, l'attribution reste valable.

Détermination du diamètre de Jupiter

Bac 2022 Centres étrangers 1 Jour 2 · Exercice 2 **5 points** **Durée conseillée 53 min**

1 Rappeler la définition du grossissement G de la lunette en fonction de α et α'.

Le grossissement est le rapport de l'angle α' sous lequel l'objet est vu à travers la lunette à l'angle α sous lequel il est vu à l'œil nu :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

PIÈGE
Inverser le rapport. Une lunette agrandit l'angle de vision : $\alpha' > \alpha$, donc $G > 1$. Le grossissement est sans unité.

2 En reprenant le premier paragraphe du document, montrer que $\alpha_J = \dfrac{2\,\alpha_L}{G}$.

Huygens voit Jupiter, à travers la lunette, deux fois plus gros que la Lune à l'œil nu. En notant α'_J l'angle sous lequel Jupiter est vu dans la lunette :

$$\alpha'_J = 2\,\alpha_L$$

Par définition du grossissement (Q1), appliquée à Jupiter : $G = \dfrac{\alpha'_J}{\alpha_J}$,

donc $\alpha_J = \dfrac{\alpha'_J}{G}$.

$$\alpha_J = \frac{2\,\alpha_L}{G}$$

COMPRENDRE
« Voir deux fois plus gros » compare des angles, pas des tailles réelles : celui de Jupiter dans la lunette (α'_J) et celui de la Lune à l'œil nu (α_L).

3 Montrer que l'on retrouve la valeur du diamètre apparent de Jupiter trouvée dans un premier temps par Huygens.

Données utiles $\alpha_L = 8{,}7 \times 10^{-3}$ rad ; $G = 164$ (estimation de Huygens)

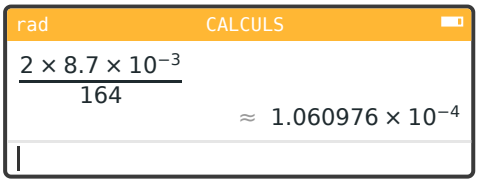
$$\alpha_J = \frac{2\,\alpha_L}{G} = \frac{2 \times 8{,}7 \times 10^{-3}}{164} = 1{,}1 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

$\alpha_J = 1{,}1 \times 10^{-4}$ rad, soit environ 10^{-4} rad : c'est bien l'estimation de Huygens.

PIÈGE
Utiliser $\alpha_L = 0{,}5$ en degrés : le résultat serait en degrés, alors que le document donne α_J en radians.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme α_L (le facteur 2 est exact). Le document n'annonce qu'un ordre de grandeur, 10^{-4} rad : les deux valeurs sont compatibles.

À LA CALCULATRICE



4 Indiquer où se forme l'image intermédiaire A_1B_1 de l'objet AB formée par l'objectif. Justifier que l'ensemble des deux lentilles constitue un système afocal.

L'objet AB est à l'infini : son image A_1B_1 par l'objectif L_1 se forme dans le plan focal image de L_1, avec A_1 en F'_1.

Comme F'_1 et F_2 sont confondus, A_1B_1 se trouve dans le plan focal objet de l'oculaire L_2. L'image que L_2 en donne est donc rejetée à l'infini.

Un objet à l'infini a son image finale à l'infini : la lunette est bien un système **afocal**.

MÉTHODE
Deux propriétés à connaître pour une lentille convergente : objet à l'infini → image dans le plan focal image ; objet dans le plan focal objet → image à l'infini. La lunette afocale les enchaîne.

5 Sur l'annexe, construire l'image intermédiaire A_1B_1 de l'objet AB, situé à l'infini, à travers la lentille L_1.

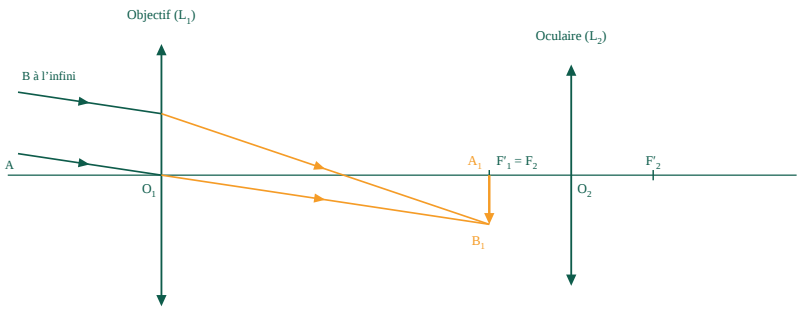
Le rayon issu de B qui passe par le centre optique O_1 n'est pas dévié : on le prolonge jusqu'au plan focal image de L_1 (perpendiculaire à l'axe passant par F_1'). Leur intersection est B_1.

Le second rayon issu de B, parallèle au premier, converge lui aussi en B_1 après L_1.

A_1 est sur l'axe optique, en F_1'.

A_1B_1 est perpendiculaire à l'axe en F_1', sous l'axe : l'image intermédiaire est renversée.

PIÈGE
Faire converger les rayons venant de B au foyer F_1'. Seuls des rayons parallèles à l'axe passent par F_1' ; des rayons inclinés convergent en un autre point du plan focal image.



5 · Annexe : l'image intermédiaire A_1B_1 se forme dans le plan focal image de l'objectif

6 Sur l'annexe, représenter le faisceau émergent issu de B, délimité par les deux rayons incidents déjà tracés, traversant l'ensemble de la lunette afocale.

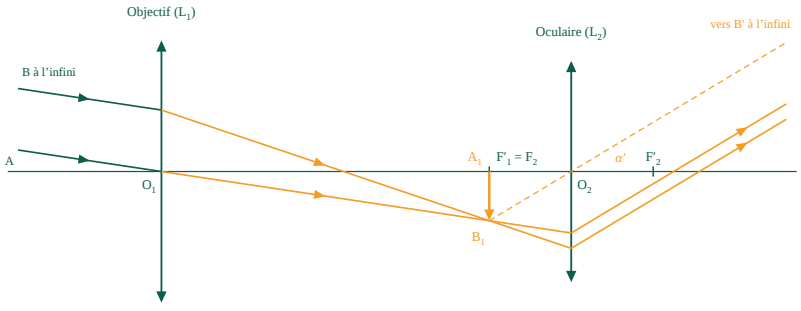
Les deux rayons se croisent en B_1 puis se prolongent en ligne droite jusqu'à l'oculaire L_2.

B_1 est dans le plan focal objet de L_2 : tous les rayons issus de B_1 ressortent de L_2 parallèles entre eux.

Pour connaître leur direction, on trace en pointillés le rayon issu de B_1 passant par le centre optique O_2, qui n'est pas dévié.

Les deux rayons émergent de L_2 parallèlement à la droite (B_1O_2), inclinés de α' sur l'axe optique.

MÉTHODE
Rayon quelconque à la sortie d'une lentille : chercher un rayon particulier issu du même point (ici celui qui passe par O_2) ; il donne la direction de tous les autres quand le point est dans le plan focal objet.



6 · Annexe complétée : faisceau émergent parallèle à la droite (B_1O_2)

7 Par des considérations géométriques, déterminer l'expression du grossissement G en fonction des distances focales f_1' et f_2'.

Dans le triangle $O_1A_1B_1$, rectangle en A_1, avec $O_1A_1 = f_1'$:

$$\tan\alpha_J = \frac{A_1B_1}{f_1'} \quad \text{soit} \quad \alpha_J = \frac{A_1B_1}{f_1'} \text{ (angle petit)}$$

Dans le triangle $O_2A_1B_1$, rectangle en A_1, avec $O_2A_1 = f_2'$:

$$\tan\alpha' = \frac{A_1B_1}{f_2'} \quad \text{soit} \quad \alpha' = \frac{A_1B_1}{f_2'}$$

D'où : $G = \dfrac{\alpha'}{\alpha_J} = \dfrac{A_1B_1}{f_2'} \times \dfrac{f_1'}{A_1B_1}$

$$\boxed{G = \frac{f_1'}{f_2'}}$$

PIÈGE
Donner la formule sans démonstration : la question demande des « considérations géométriques », donc les deux triangles et l'approximation des petits angles.

COMPRENDRE
L'image intermédiaire A_1B_1 est le côté commun aux deux triangles : elle disparaît du rapport. Le grossissement ne dépend que des deux lentilles, pas de l'astre observé.

8 Expliquer le calcul effectué par Huygens, dans le deuxième paragraphe du document, pour obtenir la valeur de l'angle α_J à partir de la taille de l'image intermédiaire.

Données utiles $A_1B_1 = 2$ mm ; $f_1' = 10{,}35$ m

Huygens mesure la taille de l'image intermédiaire : $A_1B_1 = 2\text{ mm} = 2 \times 10^{-3}$ m.

D'après le triangle $O_1A_1B_1$ (Q7), l'angle sous lequel Jupiter est vu à l'œil nu vaut :

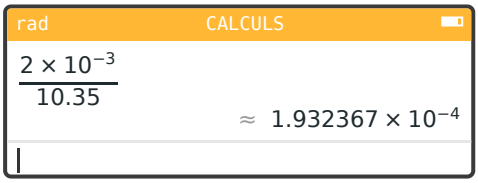
$$\alpha_J = \frac{A_1B_1}{f_1'} = \frac{2 \times 10^{-3}}{10{,}35} = 1{,}9 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

$\alpha_J \approx 2 \times 10^{-4}$ rad : on retrouve la valeur calculée par Huygens.

PIÈGE
Diviser 2 mm par 10,35 m sans conversion : les deux longueurs doivent être dans la même unité pour obtenir un angle en radians.

COMPRENDRE
Ce calcul n'utilise que l'objectif : ni l'oculaire ni le grossissement n'interviennent. La mesure n'a qu'un chiffre significatif (2 mm), le résultat aussi.

À LA CALCULATRICE



9 Calculer le grossissement de la lunette de Huygens et expliquer pourquoi la première détermination de α_J était nécessairement moins précise que la seconde.

Données utiles $f_1' = 10{,}35$ m ; $f_2' = 63$ mm

$$G = \frac{f_1'}{f_2'} = \frac{10{,}35}{63 \times 10^{-3}} = 164$$

Cette valeur est celle que Huygens attribuait à sa lunette (deux chiffres significatifs garantis : $1{,}6 \times 10^2$).

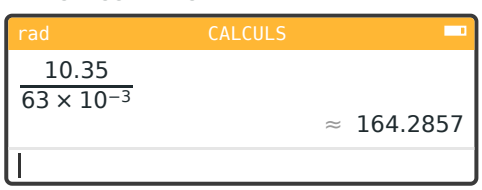
La première détermination repose sur une impression visuelle : Jupiter vu dans la lunette « deux fois plus gros » que la Lune à l'œil nu. Ce facteur 2 est évalué à l'œil, sans instrument, et le grossissement est lui-même estimé.

La seconde repose sur la mesure d'une longueur, la taille de l'image intermédiaire, grâce à un repère placé dans la lunette.

$G = 164$; une mesure de longueur est plus précise qu'une comparaison faite à l'œil.

PIÈGE
Oublier de convertir f_2' en mètres : on trouverait $G = 0{,}16$, valeur absurde pour une lunette.

À LA CALCULATRICE



10 Calculer la valeur D du diamètre de Jupiter.

Données utiles $d = 7{,}80 \times 10^{8}$ km ; $\alpha_J = 2 \times 10^{-4}$ rad (document, Q8)

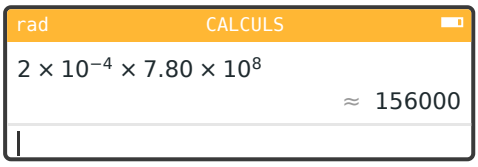
D'après la figure 1, dans le triangle rectangle de côtés D et d :
$\tan \alpha_J = \dfrac{D}{d}$.

L'angle est petit, donc $\alpha_J = \dfrac{D}{d}$, soit $D = \alpha_J \times d$.

$$D = 2 \times 10^{-4} \times 7{,}80 \times 10^{8} = 1{,}56 \times 10^{5} \text{ km}$$

$D \approx 2 \times 10^{5}$ km (un seul chiffre significatif, comme α_J).

À LA CALCULATRICE



PIÈGE
Convertir inutilement : d est en kilomètres, donc D sort directement en kilomètres. L'angle doit être en radians.

COMPRENDRE
Le diamètre équatorial réel de Jupiter est voisin de $1{,}4 \times 10^{5}$ km : la mesure de Huygens, faite en 1684 avec un simple repère, donne le bon ordre de grandeur.

Mesure de la masse de Jupiter et du Soleil

Bac 2022 Centres étrangers 1 Jour 2 · Exercice 3 **5 points** **Durée conseillée 53 min**

1 À partir de la figure 1, préciser la relation qui existe entre T^2 et a^3 pour les quatre satellites de Jupiter. Nommer la loi correspondante (établie en 1618).

Les quatre points sont alignés sur une droite qui passe par l'origine : T^2 est proportionnel à a^3.

$T^2 = k\,a^3$, soit $\dfrac{T^2}{a^3} = k$ (constante) : c'est la **troisième loi de Kepler** (loi des périodes).

PIÈGE
Écrire seulement « c'est une droite ». La proportionnalité exige une droite qui passe par l'origine : les deux arguments sont attendus.

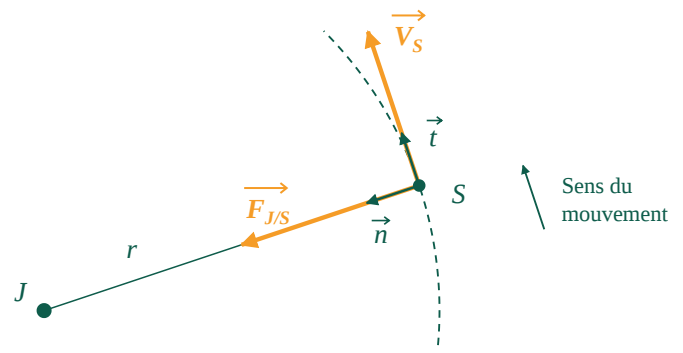
2 Reprendre les éléments de la figure 2 et représenter, sans souci d'échelle, le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_S}$ du satellite et la force de gravitation $\overrightarrow{F}_{J/S}$ exercée par Jupiter sur le satellite.

Le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_S}$ part de S ; il est tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement, donc comme $\vec{t}$.

La force $\overrightarrow{F}_{J/S}$ part de S ; elle est portée par la droite (SJ) et dirigée vers J, donc comme $\vec{n}$.

Schéma ci-dessous : $\overrightarrow{V_S}$ selon $\vec{t}$, $\overrightarrow{F}_{J/S}$ selon $\vec{n}$, tous deux appliqués en S.

PIÈGE
Faire partir la force de J, ou la dessiner vers l'extérieur de la trajectoire. Elle s'exerce sur le satellite et elle est attractive : origine en S, flèche vers J.



2 · Figure 2 complétée : vitesse et force tracées en orange

3 Donner l'expression de la force de gravitation $\overrightarrow{F}_{J/S}$ exercée par Jupiter sur le satellite en fonction de M_J, m, G, r et $\vec{n}$.

$$\overrightarrow{F}_{J/S} = G\,\frac{m\,M_J}{r^2}\,\vec{n}$$

COMPRENDRE
Le vecteur unitaire $\vec{n}$ pointe de S vers J et la force est attractive : elle est donc selon $+\vec{n}$, sans signe « $-$ ».

4 Appliquer la deuxième loi de Newton et en déduire l'expression de la vitesse V_S du satellite en fonction de G, M_J et r.

Système {satellite}, de masse m constante ; référentiel joviocentrique supposé galiléen ; seule force : $\overrightarrow{F}_{J/S}$.

Deuxième loi de Newton : $\overrightarrow{F}_{J/S} = m\,\vec{a}$, soit $G\,\dfrac{m\,M_J}{r^2}\,\vec{n} = m\,\vec{a}$, donc

$$\vec{a} = \frac{G\,M_J}{r^2}\,\vec{n}$$

Or, dans le repère de Frenet, pour un mouvement circulaire de rayon r : $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}V_S}{\mathrm{d}t}\,\vec{t} + \dfrac{V_S^2}{r}\,\vec{n}$.

Par identification selon $\vec{n}$: $\dfrac{V_S^2}{r} = \dfrac{G\,M_J}{r^2}$, soit $V_S^2 = \dfrac{G\,M_J}{r}$.

$$\boxed{V_S = \sqrt{\frac{G\,M_J}{r}}}$$

COMPRENDRE
La masse m du satellite se simplifie : la vitesse ne dépend que de l'astre attracteur et du rayon de l'orbite.

MÉTHODE
Orbite circulaire : 1) deuxième loi de Newton ; 2) accélération dans le repère de Frenet ; 3) identification. Selon $\vec{n}$ on obtient la vitesse ; selon $\vec{t}$, $\dfrac{\mathrm{d}V_S}{\mathrm{d}t} = 0$: le mouvement est uniforme.

5 En déduire que, pour un mouvement circulaire, le quotient $\dfrac{T^2}{a^3}$ est égal à $\dfrac{4\pi^2}{G\,M_J}$.

Le mouvement est uniforme : pendant une période T, le satellite parcourt le périmètre $2\pi r$ de son orbite à la vitesse V_S.

$$T = \frac{2\pi r}{V_S} \quad \text{donc} \quad T^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{V_S^2} = 4\pi^2 r^2 \times \frac{r}{G\,M_J} = \frac{4\pi^2 r^3}{G\,M_J}$$

Pour une trajectoire circulaire, le demi-grand axe est égal au rayon : $a = r$.

$$\boxed{\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G\,M_J}}$$

PIÈGE
Oublier de justifier le passage de r à a : la démonstration est faite avec le rayon, la relation demandée porte sur le demi-grand axe.

6 À l'aide des résultats expérimentaux, calculer la masse M_J de Jupiter. Commenter un éventuel écart à la valeur tabulée.

Données utiles $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}}$; $1\ \mathrm{j^2 \cdot km^{-3}} = 7{,}46\ \mathrm{s^2 \cdot m^{-3}}$; valeur tabulée : $1{,}898\,6 \times 10^{27}$ kg

D'après les questions 1 et 5, le coefficient directeur k de la droite de la figure 1 vaut $k = \dfrac{4\pi^2}{G\,M_J}$, donc $M_J = \dfrac{4\pi^2}{G\,k}$.

Lecture sur la droite : pour $a^3 = 0{,}50 \times 10^{19}\ \mathrm{km^3}$, on lit $T^2 = 210\ \mathrm{j^2}$.

$$k = \frac{210}{0{,}50 \times 10^{19}} = 4{,}2 \times 10^{-17}\ \mathrm{j^2 \cdot km^{-3}}$$

Conversion : $k = 4{,}2 \times 10^{-17} \times 7{,}46 = 3{,}1 \times 10^{-16}\ \mathrm{s^2 \cdot m^{-3}}$.

$$M_J = \frac{4\pi^2}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 3{,}1 \times 10^{-16}} = 1{,}9 \times 10^{27}\ \mathrm{kg}$$

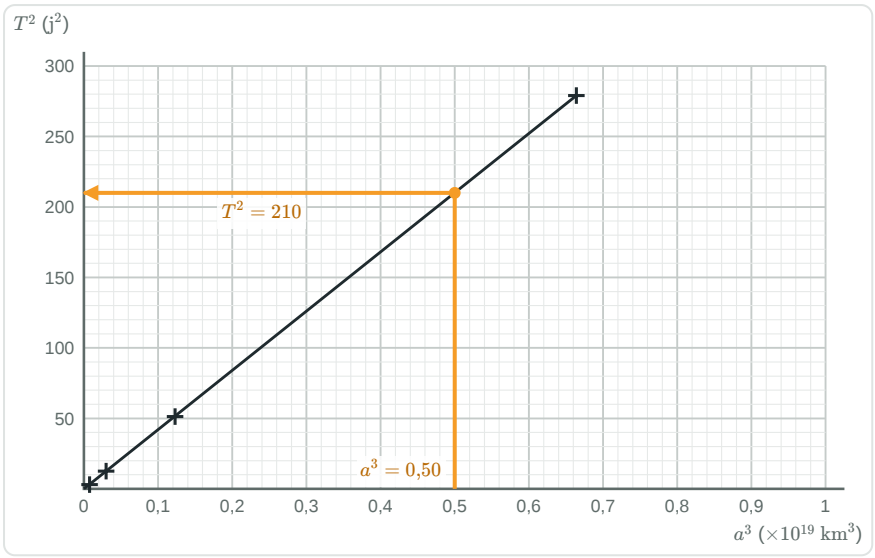
L'écart avec la valeur tabulée est inférieur à 1 % : le résultat est en accord avec elle, à la précision de la lecture graphique près.

$M_J = 1{,}9 \times 10^{27}$ kg, en accord avec la valeur tabulée $1{,}898\,6 \times 10^{27}$ kg.

PIÈGE
Utiliser k en $\mathrm{j^2 \cdot km^{-3}}$ avec G en unités SI : la masse obtenue est fausse d'un facteur 7,46. La conversion est indispensable.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs seulement : la lecture graphique ($0{,}50$ et 210) limite la précision, pas la valeur de G.

MÉTHODE
Coefficient directeur d'une droite passant par l'origine : choisir un point de la droite modèle, loin de l'origine et facile à lire sur le quadrillage, plutôt qu'un point de mesure.



À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{210}{0.50 \times 10^{19}} \approx 4.2 \times 10^{-17}$

$4.2 \times 10^{-17} \times 7.46 \approx 3.1332 \times 10^{-16}$

$\dfrac{4 \times \pi^2}{6.67 \times 10^{-11} \times 3.1332 \times 10^{-16}} \approx 1.88906 \times 10^{27}$

6 · Figure 1 du sujet, avec la lecture utilisée pour le coefficient directeur

7 Déterminer la masse du Soleil.

Données utiles distance Terre-Soleil : 150 millions de kilomètres ; $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; période de révolution de la Terre (valeur connue) : $T = 365{,}25$ j

La relation de la question 5 s'applique à tout satellite d'un astre central. On l'écrit pour la Terre, en orbite quasi circulaire autour du Soleil de masse M_S :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G\,M_S} \quad \text{donc} \quad M_S = \frac{4\pi^2 a^3}{G\,T^2}$$

Avec $a = 150 \times 10^6\ \text{km} = 1{,}50 \times 10^{11}\ \text{m}$ et $T = 365{,}25 \times 24 \times 3600 = 3{,}156 \times 10^7\ \text{s}$:

$$M_S = \frac{4\pi^2 \times (1{,}50 \times 10^{11})^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times (3{,}156 \times 10^7)^2}$$

$$\boxed{M_S = 2{,}01 \times 10^{30}\ \text{kg}}$$

PIÈGE
Laisser a en kilomètres ou T en jours : G impose des mètres et des secondes. Le cube et le carré amplifient fortement toute erreur d'unité.

MÉTHODE
Question ouverte : annoncer le satellite choisi (la Terre), la relation utilisée et la donnée apportée de mémoire (un an), puis mener le calcul en unités SI.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$365.25 \times 24 \times 3600 \approx 3.15576 \times 10^7$

$\dfrac{4 \times \pi^2 \times (1.50 \times 10^{11})^3}{6.67 \times 10^{-11} \times 31\,557\,600^2} \approx 2.005856 \times 10^{30}$

Capacité thermique massique du cuivre

Bac 2022 Centres étrangers 1 Jour 2 · Exercice 4 **5 points** **Durée conseillée 53 min**

1 Prévoir le sens du transfert thermique Q qui a lieu entre le système et le thermostat.

Données utiles $\theta_a = 20{,}5\ ^\circ\text{C}$; $\theta_{th} = 100{,}0\ ^\circ\text{C}$

Un transfert thermique se fait spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Ici $\theta_{th} > \theta_a$: l'air de l'étuve est plus chaud que le cuivre.

Le transfert thermique a lieu de l'air de l'étuve (thermostat) vers l'échantillon de cuivre : le système reçoit de l'énergie, $Q > 0$.

COMPRENDRE
Q est compté positivement quand le système le reçoit. Ce signe se retrouve dans la loi de Newton de l'énoncé : $\Phi = h\,S\,(\theta_{th} - \theta(t))$ est positif tant que le cuivre est plus froid que l'air.

2 Écrire le premier principe pour le système et en déduire une relation entre Q, m, c et $\Delta\theta$.

Système {échantillon de cuivre}, au repos et incompressible. Premier principe : $\Delta U = W + Q$.

Le système n'échange aucun travail avec l'extérieur ($W = 0$), donc $\Delta U = Q$.

Or, pour un système incompressible, $\Delta U = m\,c\,\Delta\theta$.

$$Q = m\,c\,\Delta\theta$$

PIÈGE
Écrire directement $Q = m\,c\,\Delta\theta$ sans le premier principe : la question demande de l'énoncer et de justifier $W = 0$.

3 Donner la relation liant le transfert thermique Q et le flux thermique Φ pendant la durée très courte Δt, Φ étant supposé constant.

Le flux thermique est l'énergie transférée par unité de temps : $\Phi = \dfrac{Q}{\Delta t}$.

$$Q = \Phi\,\Delta t$$

COMPRENDRE
Un flux thermique est une puissance : Φ en watts, Δt en secondes, Q en joules.

4 En déduire une relation entre h, S, θ_{th}, $\theta(t)$, m, c, $\Delta\theta$ et Δt.

Les questions 2 et 3 donnent deux expressions de Q : $m\,c\,\Delta\theta = \Phi\,\Delta t$.

Avec la loi de Newton $\Phi = h\,S\,(\theta_{th} - \theta(t))$:

$$m\,c\,\Delta\theta = h\,S\,(\theta_{th} - \theta(t))\,\Delta t$$

5 Établir l'équation différentielle vérifiée par $\theta(t)$ et la mettre sous la forme $\dfrac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t} + \dfrac{1}{\tau}\,\theta(t) = \dfrac{\theta_{th}}{\tau}$ avec $\tau = \dfrac{m\,c}{h\,S}$.

On divise la relation de la question 4 par $m\,c\,\Delta t$:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{h\,S}{m\,c}\,(\theta_{th} - \theta(t))$$

Quand Δt tend vers 0, $\dfrac{\Delta\theta}{\Delta t}$ tend vers la dérivée $\dfrac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t}$:

$$\frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{h\,S}{m\,c}\,\theta_{th} - \frac{h\,S}{m\,c}\,\theta(t)$$

On regroupe les termes en $\theta(t)$ à gauche et on pose $\tau = \dfrac{m\,c}{h\,S}$, soit $\dfrac{h\,S}{m\,c} = \dfrac{1}{\tau}$:

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\tau}\,\theta(t) = \frac{\theta_{th}}{\tau} \text{ avec } \tau = \frac{m\,c}{h\,S}}$$

MÉTHODE
Pour passer d'un bilan sur une durée courte à une équation différentielle : diviser par Δt, faire tendre Δt vers 0, puis isoler la dérivée avec un coefficient 1 devant elle.

6 La solution est de la forme $\theta(t) = A\,\mathrm{e}^{-t/\tau} + B$. Déterminer l'expression des constantes A et B en fonction de θ_a et θ_{th}, en détaillant le raisonnement.

Données utiles $\lim\limits_{x\to+\infty} \mathrm{e}^{-x} = 0$

Aux temps longs : $\mathrm{e}^{-t/\tau}$ tend vers 0, donc $\theta(t)$ tend vers B. Le cuivre finit à la température du thermostat : $B = \theta_{th}$.

Condition initiale : à $t = 0$, $\theta(0) = \theta_a$. Or $\theta(0) = A\,\mathrm{e}^0 + B = A + \theta_{th}$, donc $A = \theta_a - \theta_{th}$.

$\boxed{A = \theta_a - \theta_{th} \text{ et } B = \theta_{th}, \text{ soit } \theta(t) = (\theta_a - \theta_{th})\,\mathrm{e}^{-t/\tau} + \theta_{th}}$

PIÈGE
Écrire $A = \theta_a$ en oubliant que $\theta(0) = A + B$. Ici A est négatif : la température augmente.

MÉTHODE
Deux constantes, deux conditions : l'état final (dérivée nulle, exponentielle nulle) donne B, l'état initial donne A. On peut aussi trouver B en reportant la solution dans l'équation différentielle.

7 Montrer que l'application numérique conduit à $\theta(t) = 100 - 79{,}5 \times \mathrm{e}^{-t/784}$, avec t en s.

Données utiles $m = 44{,}8$ g ; $c = 385$ J · kg^{-1} · K^{-1} ; $h = 10$ W · m^{-2} · K^{-1} ; $S = 22$ cm^2 ; $\theta_a = 20{,}5$ °C ; $\theta_{th} = 100{,}0$ °C ; A et B (Q6)

Temps caractéristique, avec $m = 44{,}8 \times 10^{-3}$ kg et $S = 22 \times 10^{-4}$ m^2 :

$$\tau = \frac{m\,c}{h\,S} = \frac{44{,}8 \times 10^{-3} \times 385}{10 \times 22 \times 10^{-4}} = 784 \text{ s}$$

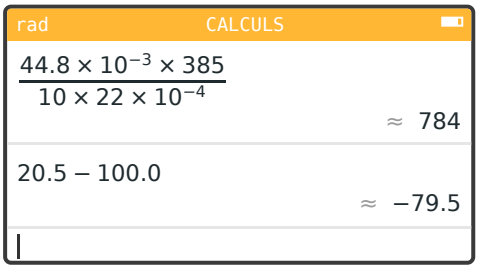
Constantes : $A = \theta_a - \theta_{th} = 20{,}5 - 100{,}0 = -79{,}5$ °C et $B = \theta_{th} = 100{,}0$ °C.

$\boxed{\theta(t) = 100 - 79{,}5 \times \mathrm{e}^{-t/784} \text{ (}\theta\text{ en °C, }t\text{ en s) : c'est l'expression attendue.}}$

PIÈGE
Conversions : $44{,}8$ g $= 44{,}8 \times 10^{-3}$ kg et 22 cm$^2 = 22 \times 10^{-4}$ m^2 (et non 22×10^{-2}). Sans elles, τ est faux d'un facteur 10 à 1000.

COMPRENDRE
Chiffres significatifs : h et S n'en ont que deux, on écrirait en toute rigueur $\tau \approx 7{,}8 \times 10^2$ s. On garde 784 s pour retrouver l'expression de l'énoncé.

À LA CALCULATRICE



8 Déterminer la date t_1 à partir de laquelle la température du système sera supérieure à 99 °C.

Données utiles $\theta(t) = 100 - 79{,}5 \times \mathrm{e}^{-t/784}$ (Q7)

On cherche t_1 tel que $\theta(t_1) = 99\ ^\circ\mathrm{C}$:

$100 - 79{,}5 \times \mathrm{e}^{-t_1/784} = 99$, soit $\mathrm{e}^{-t_1/784} = \dfrac{1}{79{,}5}$

On prend le logarithme népérien : $-\dfrac{t_1}{784} = \ln\left(\dfrac{1}{79{,}5}\right) = -\ln(79{,}5)$

$$t_1 = 784 \times \ln(79{,}5) = 3{,}43 \times 10^3 \text{ s}$$

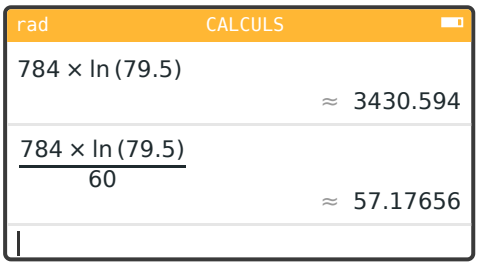
La température est croissante : elle dépasse 99 °C pour toute date $t > t_1$.

$t_1 = 3{,}43 \times 10^3$ s, soit environ 57 min

PIÈGE
Si l'on résout l'inéquation, diviser par un nombre négatif change le sens de l'inégalité : on doit trouver $t > t_1$, pas $t < t_1$.

COMPRENDRE
$t_1 \approx 4{,}4\,\tau$: il faut plusieurs temps caractéristiques pour atteindre le thermostat à 1 °C près. Laisser l'échantillon une heure dans l'étuve suffit donc.

À LA CALCULATRICE



9 Sachant que l'ensemble {échantillon de cuivre, eau} est isolé dans le calorimètre, montrer que $c = \dfrac{m_e\, c_{eau}\, (\theta_f - \theta_e)}{m\, (\theta_{th} - \theta_f)}$.

L'ensemble {cuivre, eau} est isolé et n'échange pas de travail : son énergie interne ne varie pas.

$$\Delta U_{\text{eau}} + \Delta U_{\text{cuivre}} = 0$$

L'eau passe de θ_e à θ_f, le cuivre de θ_{th} à θ_f :

$$m_e\, c_{eau}\, (\theta_f - \theta_e) + m\, c\, (\theta_f - \theta_{th}) = 0$$

donc $m\, c\, (\theta_{th} - \theta_f) = m_e\, c_{eau}\, (\theta_f - \theta_e)$.

$$c = \frac{m_e\, c_{eau}\, (\theta_f - \theta_e)}{m\, (\theta_{th} - \theta_f)}$$

PIÈGE
Chaque variation s'écrit « température finale moins température initiale » du corps concerné. Pour le cuivre, c'est $\theta_f - \theta_{th}$, négatif : il se refroidit.

COMPRENDRE
L'énergie cédée par le cuivre est intégralement reçue par l'eau : c'est ce que traduit la somme nulle.

10 Faire l'application numérique. Proposer une explication à un éventuel écart avec la valeur tabulée.

Données utiles $m_e = 100$ g ; $m = 44{,}8$ g ; $c_{eau} = 4180$ J · kg^{-1} · K^{-1} ; $\theta_e = 20{,}5$ °C ; $\theta_f = 23{,}1$ °C ; $\theta_{th} = 100{,}0$ °C ; valeur tabulée 385 J · kg^{-1} · K^{-1}

$$c = \frac{100 \times 4180 \times (23{,}1 - 20{,}5)}{44{,}8 \times (100{,}0 - 23{,}1)} = 3{,}2 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

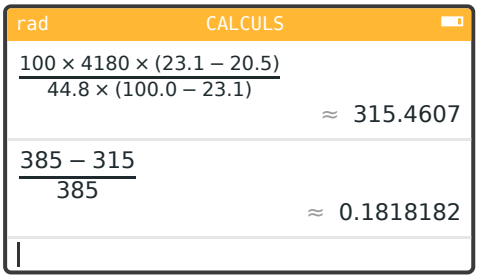
Les deux masses peuvent rester en grammes : leur rapport est sans unité.

La valeur obtenue est inférieure à la valeur tabulée (385 J · kg^{-1} · K^{-1}), avec un écart relatif d'environ 18 %.

Explications possibles : l'eau a reçu moins d'énergie que le cuivre n'en a cédé. Le cuivre se refroidit dans l'air pendant son transport de l'étuve au calorimètre ; le calorimètre lui-même absorbe une partie de l'énergie ; l'enceinte n'est pas parfaitement calorifugée. La température finale mesurée est alors trop basse, et c est sous-estimée.

$c = 3{,}2 \times 10^2$ J · kg^{-1} · K^{-1}, inférieure à la valeur tabulée : l'ensemble {cuivre, eau} n'est pas réellement isolé.

À LA CALCULATRICE



COMPRENDRE

Deux chiffres significatifs seulement : l'écart $\theta_f - \theta_e = 2{,}6$ °C n'en a que deux. Une erreur de 0,1 °C sur cet écart change déjà c d'environ 4 %.

MÉTHODE

Pour expliquer un écart, chercher l'hypothèse du modèle la moins bien vérifiée (ici « isolé » et « le calorimètre ne participe pas ») et dire dans quel sens elle fausse le résultat.