Corrigé complet — Bac S 2017 Amérique du Sud (ancien programme)

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

Ex 1	**Water Jump** Énergie mécanique · Conservation de l'énergie · Deuxième loi de Newton · Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme · Équations horaires · Sommet de la trajectoire	6 pts	50 min	15 questions	p. 2
Ex 2	**Le grand four solaire d'Odeillo** Puissance et énergie · Transferts thermiques · Capacité thermique et changement d'état · Réaction acide-base · Base faible et pH · Bilan de matière	9 pts	1 h 30	20 questions	p. 7
Ex 3	**Une odeur d'ananas** Estérification · Formules topologiques · Spectroscopie infrarouge · Mécanisme réactionnel et flèches courbes · Quantité de matière et densité · Chauffage à reflux	5 pts	50 min	7 questions	p. 13
Ex 4	**Spécialité : Les dômes de l'opéra Garnier** Oxydoréduction · Corrosion du cuivre · Bilan de matière · Masse volumique · Lecture d'un plan à l'échelle · Résolution de problème	5 pts	50 min	3 questions	p. 17

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.

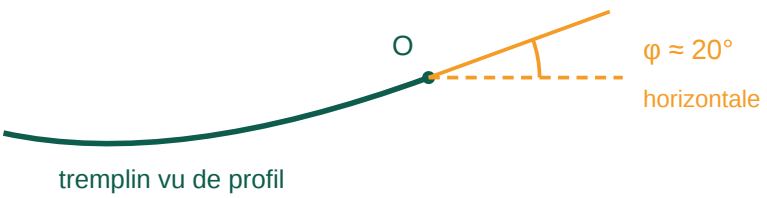
Water Jump

Bac S 2017 Amérique du Sud (ancien programme) · Exercice 1 **6 points** **Durée conseillée 50 min**

1.1 Par des mesures, estimer l'angle φ du tremplin photographié de profil.

Sur la photographie de profil, on trace l'horizontale et la droite qui prolonge l'extrémité du tremplin, puis on mesure au rapporteur l'angle entre les deux.

$\varphi \approx 20^\circ$



1.1 · Angle à mesurer à la sortie du tremplin

COMPRENDRE
Une mesure sur photographie est peu précise (perspective, épaisseur du trait) : quelques degrés d'écart sont acceptables. Il suffit ici de trancher entre 20° et 45°.

MÉTHODE
Sans rapporteur : construire un triangle rectangle dont l'hypoténuse suit le tremplin, mesurer à la règle le côté vertical et le côté horizontal, puis calculer $\varphi = \arctan\left(\frac{\text{côté vertical}}{\text{côté horizontal}}\right)$.

1.2 S'agit-il du tremplin débutant ou expert ?

Données utiles tremplin débutant : $\varphi_1 = 20^\circ$; tremplin expert : $\varphi_2 = 45^\circ$; $\varphi \approx 20^\circ$ (1.1)

L'angle mesuré est voisin de $\varphi_1 = 20^\circ$ et nettement inférieur à $\varphi_2 = 45^\circ$.

Il s'agit du tremplin **débutant**.

1.3 Quel est l'intérêt d'humidifier le toboggan avant son utilisation ?

L'eau forme un film entre la piste et les skis : elle réduit les frottements, ce qui permet au skieur de prendre le plus de vitesse possible.

COMPRENDRE
C'est ce qui rend acceptable l'hypothèse de l'énoncé, « les frottements seront négligés », utilisée dans toute la suite.

1.4 Exprimer l'énergie mécanique E_{mA} du skieur à l'instant initial, lorsqu'il s'élance du point A sans vitesse initiale.

Données utiles origine de l'énergie potentielle de pesanteur au sol ; altitude de A : H_1 (tremplin débutant)

$$E_{mA} = E_{cA} + E_{ppA} = \frac{1}{2} m v_A^2 + m g H_1$$

Le skieur part sans vitesse : $v_A = 0$, donc $E_{cA} = 0$.

$E_{mA} = m g H_1$

PIÈGE
L'altitude se compte depuis le sol, origine de l'énergie potentielle : en A elle vaut H_1, et non $H_1 - h_1$.

1.5 Déterminer la relation entre l'énergie mécanique E_{mO} au moment où le skieur quitte la piste en O et l'énergie mécanique E_{mA}. Justifier.

Entre A et O, le skieur est soumis à son poids, force conservative, et à la réaction de la piste. Sans frottement, cette réaction est perpendiculaire au déplacement : elle ne travaille pas.

Aucune force non conservative ne travaille, donc l'énergie mécanique se conserve.

$E_{mO} = E_{mA}$

PIÈGE
Écrire « il n'y a que le poids » : la piste agit aussi sur le skieur. La justification attendue est que sa réaction ne travaille pas en l'absence de frottement.

1.6 Déterminer la vitesse du skieur au point O.

Données utiles $g = 9{,}81\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; $H_1 = 3{,}5\ \text{m}$; $h_1 = 0{,}85\ \text{m}$

En O, le skieur est à l'altitude h_1 avec la vitesse v_O : $E_{mO} = \frac{1}{2} m v_O^2 + m g h_1$.

Conservation de l'énergie mécanique (1.5) : $\frac{1}{2} m v_O^2 + m g h_1 = m g H_1$

En simplifiant par m : $v_O^2 = 2 g (H_1 - h_1)$, soit $v_O = \sqrt{2 g (H_1 - h_1)}$

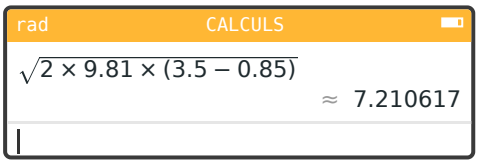
$$v_O = \sqrt{2 \times 9{,}81 \times (3{,}5 - 0{,}85)}$$

$v_O = 7{,}2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

PIÈGE
Oublier l'énergie potentielle en O. Le point O n'est pas au sol : seul le dénivelé $H_1 - h_1$ est converti en énergie cinétique.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme H_1 et h_1. La masse se simplifie : la vitesse de sortie est la même pour tous les skieurs, quelle que soit leur masse.

À LA CALCULATRICE



1.7 Le skieur s'élance depuis le tremplin médian. Expliquer qualitativement comment varie son énergie mécanique par rapport à la situation précédente.

Données utiles $H_2 = 7{,}0\ \text{m}$; $H_1 = 3{,}5\ \text{m}$; $E_{mA} = m g H$ (1.4)

L'énergie mécanique est égale à l'énergie potentielle de pesanteur au départ : $E_m = m g H$. Elle est proportionnelle à la hauteur H du point de départ.

Le skieur part de plus haut ($H_2 = 2 H_1$) : son énergie mécanique est plus grande, elle est doublée.

1.8 Peut-on affirmer que la vitesse du skieur à la sortie du tremplin double lorsque la hauteur du toboggan double ? Justifier qualitativement.

Données utiles $v_O = \sqrt{2 g (H - h)}$ (1.6)

D'après 1.6, $v_O = \sqrt{2 g (H - h)}$: la vitesse varie comme la racine carrée du dénivelé $H - h$. Elle n'est pas proportionnelle à H.

Non : quand H double, la vitesse augmente mais ne double pas.

COMPRENDRE
Doubler la vitesse revient à quadrupler l'énergie cinétique, car $E_c = \frac{1}{2} m v^2$. Il faudrait donc un dénivelé $H - h$ quatre fois plus grand.

2.1 En détaillant le raisonnement et en précisant la loi utilisée, exprimer le vecteur accélération $\vec{a}$ du skieur lorsqu'il a quitté le toboggan.

Système {skieur et son équipement}, de masse m constante ; référentiel terrestre supposé galiléen.

Bilan des forces : après O, les frottements étant négligés, le skieur n'est soumis qu'à son poids $\vec{P} = m\,\vec{g}$ (chute libre).

Deuxième loi de Newton : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\,\vec{a}$, soit $m\,\vec{g} = m\,\vec{a}$.

$$\boxed{\vec{a} = \vec{g}}$$

MÉTHODE
Toujours quatre étapes : système, référentiel galiléen, bilan des forces, deuxième loi de Newton. Chacune rapporte des points, même quand le résultat est connu d'avance.

2.2 Le chronomètre est déclenché lorsque le skieur est en O. Déduire de la question précédente les équations horaires $x(t)$ et $z(t)$ du mouvement dans le repère (O, x, z).

Données utiles $\vec{a} = \vec{g}$ (2.1) ; à $t = 0$: skieur en O, vitesse $\vec{v}_0$ faisant l'angle φ avec l'horizontale

L'axe (Oz) est vertical vers le haut et $\vec{g}$ vers le bas : $a_x = 0$; $a_z = -g$

Comme $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$, on cherche les primitives : $v_x = C_1$; $v_z = -g\,t + C_2$

À $t = 0$, $\vec{v} = \vec{v}_0$ de coordonnées $(v_0 \cos\varphi\ ;\ v_0 \sin\varphi)$, donc $C_1 = v_0 \cos\varphi$ et $C_2 = v_0 \sin\varphi$:

$$v_x = v_0 \cos\varphi \quad ; \quad v_z = -g\,t + v_0 \sin\varphi$$

Comme $\vec{v} = \dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{OG}}{\mathrm{d}t}$, on cherche à nouveau les primitives :

$$x = v_0 \cos\varphi \cdot t + C_3 \quad ; \quad z = -\frac{1}{2}\,g\,t^2 + v_0 \sin\varphi \cdot t + C_4$$

À $t = 0$, le skieur est en O : $x(0) = 0$ et $z(0) = 0$, donc $C_3 = 0$ et $C_4 = 0$.

$$\boxed{x(t) = v_0 \cos\varphi \cdot t \quad \text{et} \quad z(t) = -\frac{1}{2}\,g\,t^2 + v_0 \sin\varphi \cdot t}$$

PIÈGE
Oublier les constantes d'intégration, ou les donner sans justification. Chaque constante se détermine par une condition initiale écrite sur la copie : la vitesse initiale, puis la position initiale.

COMPRENDRE
Le signe « $-$ » de a_z vient de l'orientation de l'axe (Oz), vers le haut, alors que $\vec{g}$ pointe vers le bas.

3.1 Que vaut la composante de la vitesse du skieur suivant z lorsqu'il atteint son point culminant ?

Au point culminant, le skieur cesse de monter et commence à descendre : v_z change de signe. Le vecteur vitesse est alors horizontal.

$$\boxed{v_z = 0}$$

PIÈGE
Écrire que la vitesse est nulle au sommet. Seule la composante verticale s'annule : $v_x = v_0 \cos\varphi$ reste constante pendant tout le saut.

3.2 Le skieur atteint sa hauteur maximale à l'instant t_{max}. Exprimer t_{max} en fonction de v_O, g et φ.

Données utiles $v_z(t) = -g\,t + v_0 \sin\varphi$ (2.2), avec $v_0 = v_O$

Au point culminant $v_z(t_{max}) = 0$ (3.1), soit $-g\,t_{max} + v_O \sin\varphi = 0$.

$$\boxed{t_{max} = \frac{v_O \sin\varphi}{g}}$$

COMPRENDRE
Le sujet note la vitesse en O tantôt v_0 (équations horaires), tantôt v_O : il s'agit de la même grandeur.

3.3 À l'aide des équations horaires, montrer que l'ordonnée correspondante vaut $z_{max} = \dfrac{v_0^2 \sin^2 \varphi}{2g}$.

Données utiles $z(t) = -\dfrac{1}{2} g\, t^2 + v_0 \sin\varphi \cdot t$ (2.2) ; $t_{max} = \dfrac{v_0 \sin\varphi}{g}$ (3.2)

$$z_{max} = z(t_{max}) = -\frac{1}{2} g \left(\frac{v_0 \sin\varphi}{g} \right)^2 + v_0 \sin\varphi \times \frac{v_0 \sin\varphi}{g}$$

$$z_{max} = -\frac{v_0^2 \sin^2 \varphi}{2g} + \frac{v_0^2 \sin^2 \varphi}{g}$$

$z_{max} = \dfrac{v_0^2 \sin^2 \varphi}{2g}$, ce qui est bien l'expression attendue.

MÉTHODE

Vérifier l'homogénéité : v_0^2 en $\mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}$ divisé par g en $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$ donne des mètres, et $\sin^2 \varphi$ est sans unité.

3.4 Calculer la hauteur maximale atteinte H_{max} au-dessus du plan d'eau si le skieur utilise le tremplin averti.

Données utiles $v_O = 5{,}9\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $\varphi_2 = 45^\circ$; $h_2 = 1{,}7\ \mathrm{m}$; $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

z_{max} est repérée à partir de O, lui-même situé à la hauteur h_2 au-dessus de l'eau :

$$H_{max} = z_{max} + h_2 = \frac{v_O^2 \sin^2 \varphi_2}{2g} + h_2$$

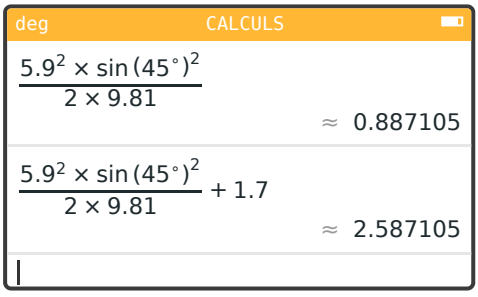
$$H_{max} = \frac{5{,}9^2 \times \sin^2(45^\circ)}{2 \times 9{,}81} + 1{,}7 = 0{,}89 + 1{,}7$$

$H_{max} = 2{,}6\ \mathrm{m}$

PIÈGE

Répondre $z_{max} = 0{,}89$ m. L'origine du repère est en O, pas au niveau de l'eau : il faut ajouter h_2. Vérifier aussi que la calculatrice est en mode degrés.

À LA CALCULATRICE



3.5 En tant qu'entraîneur, choisir le tremplin à utiliser pour que les skieurs fassent un maximum de figures en vol. Justifier à l'aide de l'expression de z_{max}.

Données utiles $z_{max} = \dfrac{v_0^2 \sin^2 \varphi}{2g}$ (3.3) ; $v_0^2 = 2\,g\,(H-h)$ (1.6) ; tableau des quatre tremplins

Il faut le saut le plus haut, donc z_{max} maximale. Or z_{max} augmente avec la vitesse v_0 et avec l'angle φ.

Avec $v_0^2 = 2\,g\,(H-h)$: $\quad z_{max} = \dfrac{2\,g\,(H-h)\,\sin^2\varphi}{2g} = (H-h)\,\sin^2\varphi$

- débutant : $z_{max} = (3{,}5 - 0{,}85) \times \sin^2(20^\circ) = 0{,}31$ m, soit $H_{max} = 1{,}2$ m ;
- médian : $z_{max} = (7{,}0 - 0{,}85) \times \sin^2(20^\circ) = 0{,}72$ m, soit $H_{max} = 1{,}6$ m ;
- averti : $z_{max} = (3{,}5 - 1{,}7) \times \sin^2(45^\circ) = 0{,}90$ m, soit $H_{max} = 2{,}6$ m ;
- expert : $z_{max} = (7{,}0 - 1{,}7) \times \sin^2(45^\circ) = 2{,}7$ m, soit $H_{max} = 4{,}4$ m.

Il faut choisir le tremplin **expert** : le skieur s'élève de 2,7 m au-dessus de O, soit 4,4 m au-dessus de l'eau.

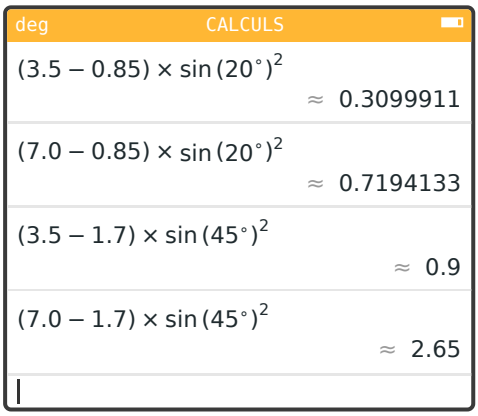
PIÈGE

Choisir le médian parce que la vitesse de sortie y est la plus grande. L'angle compte autant : avec $\varphi = 20^\circ$, l'essentiel de la vitesse est horizontal et le saut reste bas.

COMPRENDRE

L'énoncé renvoie à « la question 2 » pour l'expression de z_{max} : c'est une coquille, elle est établie à la question 3.3.

À LA CALCULATRICE



Le grand four solaire d'Odeillo

Bac S 2017 Amérique du Sud (ancien programme) · Exercice 2 **9 points** **Durée conseillée 1 h 30**

1.1 Exprimer, puis calculer, la puissance réfléchie par l'ensemble des héliostats.

Données utiles surface totale des héliostats $S_h = 2835\ \text{m}^2$; puissance surfacique reçue $p = 720\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; réflectivité $r = 70\ \% = 0{,}70$

Les héliostats reçoivent la puissance $P_{\text{reçue}} = p \times S_h$ et n'en réfléchissent que la fraction r :

$$P_{\text{réfl}} = r \times p \times S_h$$

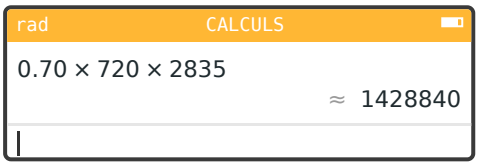
$P_{\text{réfl}} = 0{,}70 \times 720 \times 2835 = 1{,}43 \times 10^6\ \text{W}$

$P_{\text{réfl}} = r\,p\,S_h = 1{,}43 \times 10^6\ \text{W}$, soit 1,43 MW

PIÈGE
Prendre la surface de la parabole ($1830\ \text{m}^2$) : ce sont les héliostats qui captent la lumière du Soleil. Le produit 63×45 redonne bien $2835\ \text{m}^2$.

COMPRENDRE
La réflectivité « 70 % » n'a que deux chiffres significatifs. On en garde trois ici parce que la question suivante attend $1{,}00 \times 10^6$ W : on ne tronque pas un résultat intermédiaire.

À LA CALCULATRICE



1.2 Montrer que la valeur de la puissance au foyer du four d'Odeillo vaut $1{,}00 \times 10^6$ W.

Données utiles $P_{\text{réfl}} = 1{,}43 \times 10^6$ W (1.1) ; réflectivité du concentrateur $r = 0{,}70$

Toute la lumière renvoyée par les héliostats atteint le concentrateur, qui en réfléchit à son tour la fraction r vers le foyer :

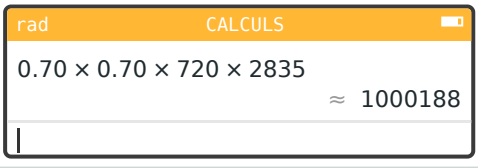
$$P_{\text{foyer}} = r \times P_{\text{réfl}} = r^2 \times p \times S_h$$

$P_{\text{foyer}} = 0{,}70 \times 1{,}43 \times 10^6 = 1{,}00 \times 10^6\ \text{W}$

$P_{\text{foyer}} = 1{,}00 \times 10^6$ W : on retrouve la valeur attendue, soit les 1000 kW annoncés.

PIÈGE
Recalculer une puissance reçue avec la surface du concentrateur (720×1830). Le concentrateur n'est pas éclairé directement par le Soleil : il ne reçoit que ce que les héliostats lui envoient.

À LA CALCULATRICE



1.3 Indiquer, parmi les trois relations proposées, celle liant la puissance et l'énergie.

La puissance est l'énergie transférée par unité de temps.

$P = \dfrac{E}{\Delta t}$, avec P en watts, E en joules et Δt en secondes.

MÉTHODE
En cas de doute, vérifier par les unités : $1\ \text{W} = 1\ \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$, donc une énergie divisée par une durée.

1.4 Quelle conversion d'énergie est réalisée au foyer pour que le rayonnement solaire concentré puisse percer une plaque en acier ?

La plaque absorbe le rayonnement solaire concentré : son énergie interne augmente, elle s'échauffe puis fond.

L'énergie lumineuse (rayonnement) est convertie en énergie thermique.

1.5 En déduire la température minimale atteinte au foyer pendant cette expérience.

Données utiles température de fusion de l'acier : $1500\ °C$

La plaque est percée : l'acier, solide au départ, est devenu liquide et a coulé. Il a donc atteint sa température de fusion.

La température au foyer a atteint au moins $1500\ °C$.

PIÈGE
Répondre $3400\ °C$: c'est la température maximale que le four peut atteindre, pas le minimum que prouve cette expérience.

1.6 À l'aide du texte et de la description de la plaque, montrer que la masse d'acier fondu est de l'ordre de 9 kg.

Données utiles trou de diamètre $D = 40$ cm ; épaisseur $e = 10$ mm ; $\rho = 7200\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $V = \pi R^2 e$

L'acier fondu occupait un cylindre de rayon $R = \dfrac{D}{2} = 0{,}20$ m et de longueur $e = 10 \times 10^{-3}$ m.

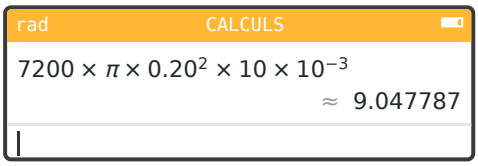
$$m = \rho \times V = \rho \times \pi R^2 e$$

$$m = 7200 \times \pi \times 0{,}20^2 \times 10 \times 10^{-3} = 9{,}0\ \text{kg}$$

$m = 9{,}0$ kg : la masse d'acier fondu est bien de l'ordre de 9 kg.

PIÈGE
Utiliser le diamètre à la place du rayon (masse multipliée par 4), ou laisser 40 cm et 10 mm sans les convertir en mètres alors que ρ est en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

À LA CALCULATRICE



1.7.1 Estimer l'énergie nécessaire pour élever la température de l'acier jusqu'à sa température de fusion, la température initiale étant de 20 °C.

Données utiles $m = 9{,}0$ kg (1.6) ; $c = 460\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot °\text{C}^{-1}$; $\theta_i = 20\ °C$; $\theta_f = 1500\ °C$

L'acier reste solide pendant cet échauffement :

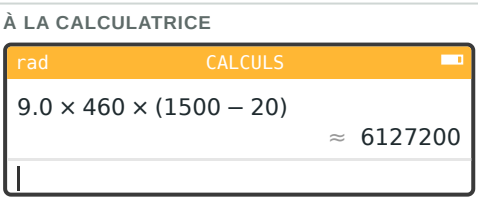
$$E_1 = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

$$E_1 = 9{,}0 \times 460 \times (1500 - 20) = 6{,}1 \times 10^6\ \text{J}$$

$E_1 = 6{,}1 \times 10^6$ J, soit 6,1 MJ

COMPRENDRE
Un écart de température a la même valeur en °C et en kelvins : inutile de convertir. Deux chiffres significatifs suffisent, la masse n'étant connue qu'à « l'ordre de 9 kg ».

À LA CALCULATRICE



1.7.2 Estimer l'énergie nécessaire à la fusion de l'acier.

Données utiles $m = 9{,}0$ kg (1.6) ; $L_f = 2{,}50 \times 10^5\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; $E = m \times L_f$

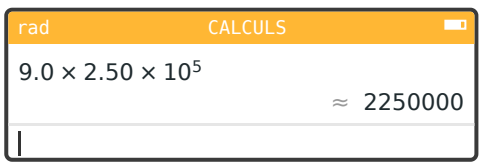
À $1500\ °C$, la fusion se fait à température constante :

$$E_2 = m \times L_f$$

$$E_2 = 9{,}0 \times 2{,}50 \times 10^5 = 2{,}3 \times 10^6\ \text{J}$$

$E_2 = 2{,}3 \times 10^6$ J, soit 2,3 MJ

À LA CALCULATRICE



1.7.3 En déduire la durée théorique nécessaire pour réaliser cette expérience.

Données utiles $E_1 = 6{,}1 \times 10^6$ J (1.7.1) ; $E_2 = 2{,}3 \times 10^6$ J (1.7.2) ; $P_{\text{foyer}} = 1{,}00 \times 10^6$ W (1.2)

Énergie totale à fournir à l'acier : $E = E_1 + E_2 = 6{,}1 \times 10^6 + 2{,}3 \times 10^6 = 8{,}4 \times 10^6$ J.

Dans ce modèle, toute la puissance disponible au foyer est reçue par l'acier. D'après la relation de la question 1.3 :

$$\Delta t = \frac{E}{P_{\text{foyer}}}$$

$$\Delta t = \frac{8{,}4 \times 10^6}{1{,}00 \times 10^6} = 8{,}4 \text{ s}$$

$\Delta t_{\text{théo}} = 8{,}4$ s

PIÈGE
Oublier l'une des deux énergies. Percer la plaque demande d'abord de chauffer l'acier jusqu'à $1500\ ^\circ\text{C}$, puis de le faire fondre : les deux étapes s'additionnent.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$6.1 \times 10^6 + 2.3 \times 10^6$ ≈ 8400000

$\frac{8.4 \times 10^6}{1.00 \times 10^6}$ ≈ 8.4

1.7.4 Comparer le résultat obtenu par calcul au résultat expérimental.

Données utiles $\Delta t_{\text{théo}} = 8{,}4$ s (1.7.3) ; durée mesurée : 1 min 27 s

Durée expérimentale : $\Delta t_{\text{exp}} = 60 + 27 = 87$ s.

$$\frac{\Delta t_{\text{exp}}}{\Delta t_{\text{théo}}} = \frac{87}{8{,}4} \approx 10$$

La durée réelle (87 s) est environ 10 fois plus grande que la durée calculée (8,4 s).

MÉTHODE
« Comparer » deux valeurs très différentes : convertir dans la même unité, puis donner leur rapport. Une simple phrase « c'est plus long » ne rapporte pas tous les points.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\frac{87}{8.4}$ ≈ 10.35714

1.7.5 Expliquer la différence entre ces deux résultats en identifiant des transferts thermiques qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle.

Le modèle suppose que toute l'énergie arrivant au foyer sert à chauffer puis à fondre les 9 kg d'acier. En réalité, une partie de cette énergie est perdue :

- par **conduction**, l'acier de la zone éclairée cède de l'énergie au reste de la plaque, plus froid ;
- par **convection**, la plaque chaude cède de l'énergie à l'air ambiant ;
- par **rayonnement**, la plaque portée à haute température émet elle-même de l'énergie ; de plus, elle réfléchit une partie de la lumière reçue au lieu de l'absorber.

L'acier ne reçoit qu'une partie de la puissance du foyer et en cède à son environnement : il faut plus de temps que prévu pour le percer.

COMPRENDRE
Autre limite du modèle : le foyer peut dépasser la température d'ébullition de l'acier ($2800\ °C$). Chauffer le métal liquide au-delà de $1500\ °C$, voire en vaporiser une partie, consomme une énergie non comptée.

2.1 Donner la formule brute de la MDEA à partir de sa formule topologique.

Chaque sommet ou extrémité de la chaîne est un atome de carbone, complété par des atomes d'hydrogène jusqu'à quatre liaisons.
Formule semi-développée :

$$HO-CH_2-CH_2-N(CH_3)-CH_2-CH_2-OH$$

On compte 5 C, 13 H ($4\times2+3+2$), 1 N et 2 O.

Formule brute de la MDEA : $C_5H_{13}NO_2$

PIÈGE
Oublier le groupe CH_3 : le trait qui part de l'atome d'azote vers le bas se termine par un atome de carbone. Les H des deux groupes OH comptent aussi.

2.2 Justifier que la réaction entre H_2S et la MDEA est une réaction acide-base et donner les couples mis en jeu.

H_2S cède un ion H^+ et devient HS^- : c'est un acide. La MDEA capte cet ion H^+ et devient $MDEAH^+$: c'est une base.

Il y a transfert d'un ion H^+ de l'acide d'un couple vers la base d'un autre couple : c'est une réaction acide-base.

Couples acide/base : H_2S / HS^- et $MDEAH^+$ / MDEA

PIÈGE
Écrire un couple à l'envers : l'acide s'écrit toujours en premier. Ici la MDEA est la base de son couple, son acide conjugué est $MDEAH^+$.

2.3 Le pH d'une solution aqueuse de MDEA de concentration 0,10 mol/L vaut 10,7. Déterminer si la MDEA est un acide fort, une base forte, un acide faible ou une base faible.

Données utiles $c = 0{,}10\ mol\cdot L^{-1}$; $pH = 10{,}7$; $pK_e = 14$ à $25\ °C$

La MDEA capte un ion H^+ (2.2) et le pH de sa solution est supérieur à 7 : c'est une base.

Si elle était forte, sa réaction avec l'eau serait totale, d'où $[HO^-] = c$ et $pH = pK_e + \log c = 14 + \log(0{,}10) = 13{,}0$

Le pH mesuré (10,7) est nettement inférieur : $[HO^-] = 10^{pH-pK_e} = 10^{10{,}7-14} = 5{,}0\times10^{-4}\ mol\cdot L^{-1}$, très inférieur à c. La réaction de la MDEA avec l'eau n'est donc pas totale.

La MDEA est une base faible.

COMPRENDRE
Seule une molécule de MDEA sur 200 environ a réagi avec l'eau ($5{,}0\times10^{-4}/0{,}10 = 0{,}5\ \%$) : la réaction est très limitée.

MÉTHODE
Fort ou faible : calculer le pH qu'aurait l'espèce si elle était forte ($-\log c$ pour un acide, $pK_e + \log c$ pour une base) et comparer au pH mesuré. S'ils diffèrent, l'espèce est faible.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$14 + \log(0.10)$

≈ 13

$10^{10.7-14}$

$\approx 5.011872 \times 10^{-4}$

2.4 Écrire l'équation de la réaction de la deuxième étape : le méthane réagit avec l'eau pour former du dihydrogène et du monoxyde de carbone.

Réactifs : CH_4 et H_2O ; produits : H_2 et CO. Le carbone et l'oxygène sont équilibrés avec des coefficients 1 ; il reste $4 + 2 = 6$ atomes H à gauche, soit $3\,H_2$ à droite.

$$CH_4\,(g) + H_2O\,(g) \longrightarrow CO\,(g) + 3\,H_2\,(g)$$

PIÈGE
Faire figurer le nickel dans l'équation : un catalyseur n'est ni un réactif ni un produit. Ne pas confondre non plus le monoxyde CO avec le dioxyde CO_2.

2.5 Quel est l'intérêt de la troisième étape, $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$?

Cette étape produit une mole de dihydrogène supplémentaire par mole de monoxyde de carbone : elle augmente la quantité de H_2 obtenue à partir d'une même quantité de méthane.

Elle élimine aussi le monoxyde de carbone, gaz toxique, en le transformant en dioxyde de carbone.

Produire davantage de dihydrogène et éliminer le monoxyde de carbone, toxique.

2.6 Montrer que le bilan des deuxième et troisième étapes s'écrit $CH_4 + 2\,H_2O \longrightarrow CO_2 + 4\,H_2$. En déduire la masse de dioxyde de carbone formé pour 1,0 kg de dihydrogène produit.

Données utiles $M_H = 1{,}0$; $M_C = 12{,}0$; $M_O = 16{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $m(H_2) = 1{,}0$ kg

On additionne membre à membre les deux équations :

$CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3\,H_2$ $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$

Le monoxyde de carbone, formé puis consommé, se simplifie :

$CH_4 + 2\,H_2O \longrightarrow CO_2 + 4\,H_2$.

D'après cette équation, $n(CO_2) = \dfrac{n(H_2)}{4}$, soit $\dfrac{m(CO_2)}{M(CO_2)} = \dfrac{m(H_2)}{4\,M(H_2)}$, d'où

$$m(CO_2) = \frac{m(H_2) \times M(CO_2)}{4\,M(H_2)}$$

avec $M(H_2) = 2{,}0\ g \cdot mol^{-1}$ et $M(CO_2) = 12{,}0 + 2 \times 16{,}0 = 44{,}0\ g \cdot mol^{-1}$.

$$m(CO_2) = \frac{1{,}0 \times 10^3 \times 44{,}0}{4 \times 2{,}0} = 5{,}5 \times 10^3\ g$$

$m(CO_2) = 5{,}5$ kg de dioxyde de carbone pour 1,0 kg de dihydrogène

PIÈGE
Raisonner directement sur les masses (« 4 fois moins de CO_2, donc 0,25 kg »). Les coefficients de l'équation relient des quantités de matière : il faut passer par les masses molaires.

COMPRENDRE
Produire 1 kg de dihydrogène par ce procédé libère plus de 5 kg de CO_2, sans compter le combustible brûlé pour chauffer : c'est ce qui motive la voie solaire.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{1.0 \times 10^3 \times 44.0}{4 \times 2.0}$

≈ 5500

2.7 Écrire l'équation de la réaction qui correspond au bilan de la transformation mise en œuvre dans le cycle 1 (zinc).

On additionne les deux étapes du cycle :

$\mathrm{ZnO} \longrightarrow \mathrm{Zn} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_2}$ $\mathrm{Zn} + \mathrm{H_2O} \longrightarrow \mathrm{ZnO} + \mathrm{H_2}$

ZnO et Zn figurent des deux côtés et se simplifient.

$\mathrm{H_2O} \longrightarrow \mathrm{H_2} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_2}$

COMPRENDRE
L'oxyde de zinc consommé à l'étape 1 est régénéré à l'étape 2 : il tourne en boucle, d'où le mot « cycle ». Seule l'eau est consommée. Le cycle 2, avec le fer, a le même bilan.

2.8 Quels sont les deux intérêts du procédé de décomposition de l'eau par cycles par rapport à la décomposition directe du gaz naturel ?

- Température : les cycles fonctionnent à $1700\ ^\circ\mathrm{C}$ au plus dans le réacteur solaire, contre environ $3000\ ^\circ\mathrm{C}$ pour la décomposition directe du méthane ; le procédé est moins exigeant en énergie et pour les matériaux.
- Séparation et ressource : le dihydrogène et le dioxygène sortent de deux réacteurs différents, alors que le procédé 1 donne un mélange dont il faut retirer les particules de carbone. De plus, le réactif est l'eau et non le gaz naturel, ressource fossile.

Température de travail bien plus basse ; dihydrogène obtenu sans carbone à séparer, à partir d'eau.

2.9 Dans le cadre de la chimie verte, trouver deux intérêts de la synthèse du dihydrogène par voie solaire par rapport à la synthèse industrielle.

- Énergie : la voie solaire utilise le rayonnement du Soleil, source renouvelable et gratuite, alors que le vaporeformage exige de chauffer entre 850 et $900\ ^\circ\mathrm{C}$ sous pression, en général avec des combustibles fossiles.
- Rejets : la voie solaire ne libère pas de dioxyde de carbone, gaz à effet de serre, alors que le vaporeformage en rejette $5{,}5$ kg par kilogramme de dihydrogène (2.6). Par les cycles, elle part en outre de l'eau, et non d'une ressource fossile.

Énergie renouvelable ; pas d'émission de gaz à effet de serre.

COMPRENDRE
Comparer deux synthèses, c'est examiner la source d'énergie, les matières premières, les sous-produits rejetés et la sécurité : ces critères permettent de juger l'impact environnemental d'un procédé.

Une odeur d'ananas

Bac S 2017 Amérique du Sud (ancien programme) · Exercice 3 **5 points** **Durée conseillée 50 min**

1.1 Écrire l'équation de la réaction de synthèse de l'ester à partir d'acide pentanoïque et d'éthanol, en formules topologiques.

On applique l'équation générale avec R^1 = chaîne à 4 carbones (acide pentanoïque) et R^2 = groupe éthyle (éthanol) : il se forme un ester et de l'eau.

L'équation en formules topologiques est tracée sur la figure ci-dessous.

$C_5H_{10}O_2 + C_2H_6O \rightleftharpoons C_7H_{14}O_2 + H_2O$: l'ester formé est le pentanoate d'éthyle.



acide pentanoïque — éthanol — pentanoate d'éthyle — eau

1.1 · Équation de la synthèse en formules topologiques

PIÈGE
Oublier la molécule d'eau, ou écrire une flèche simple : la réaction est limitée, le sujet la note avec une double flèche.

MÉTHODE
En formule topologique, chaque extrémité ou sommet de la ligne brisée est un carbone ; on n'écrit que les hétéroatomes (ici O) et les H qu'ils portent. Compter les sommets : 5 pour l'acide, 2 pour l'alcool, 5 + 2 pour l'ester.

1.2 Quelles informations du spectre infrarouge du produit permettent de savoir si la réaction a bien eu lieu ?

Données utiles O–H (alcool) : 3200 à 3400 cm^{-1} ; O–H (acide) : 2500 à 3200 cm^{-1} ; C=O : 1650 à 1750 cm^{-1} ; C–O : 1050 à 1450 cm^{-1}

Sur le spectre du produit, on relève :

- une bande fine et très intense vers 1740 cm^{-1} : liaison C=O ;
- une bande intense vers 1200 cm^{-1} : liaison C–O ;
- aucune bande large entre 2500 et 3400 cm^{-1} : pas de liaison O–H, ni celle d'un alcool, ni celle d'un acide carboxylique.

Les seules bandes vers 2900–3000 cm^{-1} sont fines : ce sont les liaisons C–H.

Le produit possède C=O et C–O mais plus de O–H : c'est bien un ester, débarrassé de l'acide et de l'alcool. La réaction a eu lieu.

COMPRENDRE
La bande C=O seule ne prouve rien : l'acide pentanoïque de départ en possède une aussi. L'argument décisif est la disparition des bandes larges O–H des deux réactifs.

1.3.1 Reproduire l'étape du mécanisme, ajouter les doublets non liants manquants et représenter la ou les flèches courbes.

Données utiles électronégativités : H 2,1 ; C 2,5 ; O 3,5

Doublets non liants : un atome O engagé dans deux liaisons porte 2 doublets non liants ; un atome O chargé $+$, engagé dans trois liaisons, n'en porte qu'un.

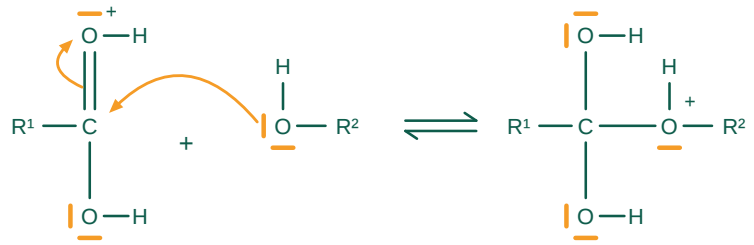
Site donneur : l'atome O de l'alcool (doublets non liants). Site accepteur : l'atome C lié à deux atomes O plus électronégatifs que lui (3,5 contre 2,5), donc appauvri en électrons.

- Première flèche : d'un doublet non liant du O de l'alcool vers l'atome C ; elle forme la liaison C–O.
- Seconde flèche : de la double liaison C=O vers l'atome O^+ ; un des deux doublets de la liaison double devient un doublet non liant.

Deux flèches courbes, chacune partant d'un doublet et pointant vers un atome accepteur (figure ci-dessous).

PIÈGE
Faire partir une flèche d'un atome ou de la charge $+$. Une flèche courbe part toujours d'un doublet (liant ou non liant) et arrive sur l'atome qui le reçoit.

COMPRENDRE
Sans la seconde flèche, le carbone aurait cinq liaisons. Vérification : la charge globale $+$ est conservée, elle passe du O de l'acide au O venu de l'alcool.



1.3.1 · Étape du mécanisme : en orange, les doublets non liants ajoutés et les deux flèches courbes

1.3.2 À quelle catégorie de réaction appartient cette étape ?

Deux espèces s'assemblent en une seule, sans autre produit, et la double liaison C=O devient une liaison simple.

Cette étape est une réaction d'**addition**.

MÉTHODE
Addition : des atomes se fixent sur une liaison multiple, un seul produit. Élimination : départ d'un groupe et création d'une liaison multiple. Substitution : un groupe en remplace un autre, deux produits.

2.1 À l'aide du cahier de laboratoire et des réactifs disponibles, déterminer l'acide carboxylique utilisé.

Données utiles $V_{\text{alcool}} = 10{,}5$ mL ; $V_{\text{acide}} = 16{,}5$ mL ; éthanol : $M = 46{,}0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, $d = 0{,}79$; acide propanoïque : $M = 74{,}1\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, $d = 0{,}99$; acide butanoïque : $M = 88{,}0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, $d = 0{,}96$; $\rho_{\text{eau}} = 1{,}00\ \text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$

Le seul alcool du laboratoire est l'éthanol. D'après l'équation, 1 mol d'acide réagit avec 1 mol d'alcool : des proportions stœchiométriques imposent $n_{\text{acide}} = n_{\text{alcool}}$.

Pour un liquide de densité d : $m = \rho V = d\,\rho_{\text{eau}}\,V$, donc $n = \dfrac{m}{M} = \dfrac{d\,\rho_{\text{eau}}\,V}{M}$.

Éthanol : $n_{\text{alcool}} = \dfrac{0{,}79 \times 1{,}00 \times 10{,}5}{46{,}0} = 0{,}18\ \text{mol}$

On calcule la quantité contenue dans 16,5 mL de chacun des deux acides :

- acide propanoïque : $n = \dfrac{0{,}99 \times 1{,}00 \times 16{,}5}{74{,}1} = 0{,}22\ \text{mol}$
- acide butanoïque : $n = \dfrac{0{,}96 \times 1{,}00 \times 16{,}5}{88{,}0} = 0{,}18\ \text{mol}$

Seul l'acide butanoïque donne la même quantité que l'éthanol.

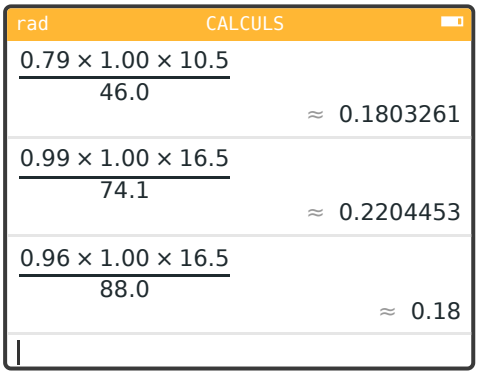
$n_{\text{acide}} = n_{\text{alcool}} = 0{,}18\ \text{mol}$: l'acide utilisé est l'**acide butanoïque**.

PIÈGE
Comparer directement les volumes ou les masses. « Proportions stœchiométriques » porte sur les quantités de matière ; il faut passer par d puis par M, avec V en mL si ρ_{eau} est en $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$.

COMPRENDRE
Les densités n'ont que deux chiffres significatifs : les quantités s'écrivent 0,18 mol et 0,22 mol. L'écart entre les deux acides (plus de 20 %) reste bien supérieur à cette imprécision.

COMPRENDRE
Le tableau du sujet donne C_3H_6O pour l'acide propanoïque : c'est une coquille, la formule est $C_3H_6O_2$, en accord avec la masse molaire indiquée. Cela ne change rien au calcul.

À LA CALCULATRICE



2.2 Indiquer les précautions à prendre lors du prélèvement des réactifs. Justifier.

D'après les pictogrammes :

- l'acide butanoïque et l'acide sulfurique concentré sont corrosifs : blouse fermée, gants et lunettes de protection, prélèvement sous hotte ;
- l'éthanol est inflammable : aucune flamme ni source de chaleur à proximité, flacon rebouché aussitôt.

Blouse, gants, lunettes et hotte (espèces corrosives) ; travail loin de toute flamme (éthanol inflammable).

MÉTHODE
Une précaution se justifie toujours par un danger lu sur le pictogramme : nommer l'espèce, son danger, puis la protection adaptée.

2.3 Pourquoi chauffe-t-on à reflux ?

Chauffer : la température est un facteur cinétique, la transformation est plus rapide à chaud.

À reflux : les vapeurs qui s'échappent du mélange (l'éthanol bout dès 79 °C) se liquéfient dans le réfrigérant et retombent dans le ballon.

Le chauffage à reflux accélère la réaction sans perte de matière.

PIÈGE

Écrire que le chauffage « augmente le rendement ». Ici il réduit seulement la durée de la synthèse ; l'acide sulfurique, catalyseur, joue le même rôle.

Spécialité : Les dômes de l'opéra Garnier

Bac S 2017 Amérique du Sud (ancien programme) · Exercice 4 **5 points** **Durée conseillée 50 min**

1 Écrire le bilan global de la formation du vert-de-gris.

Le bilan global est la somme des équations 1 et 2. L'oxyde CuO, formé par la première étape puis consommé par la seconde, disparaît du bilan.

$$2\,\mathrm{Cu\,(s)} + \mathrm{O_2\,(g)} + \mathrm{CO_2\,(g)} + \mathrm{H_2O\,(g)} \longrightarrow \mathrm{Cu_2(OH)_2CO_3\,(s)}$$

MÉTHODE
Pour additionner deux équations, on ajoute membre à membre puis on simplifie les espèces présentes des deux côtés. On contrôle ensuite la conservation de chaque élément : ici 2 Cu, 1 C, 2 H et 5 O.

2 Identifier la provenance des différents réactifs du bilan global de la formation du vert-de-gris sur les dômes de l'Opéra Garnier.

- Le cuivre Cu est le métal des plaques qui recouvrent les dômes.
- Le dioxygène $\mathrm{O_2}$, le dioxyde de carbone $\mathrm{CO_2}$ et la vapeur d'eau $\mathrm{H_2O}$ sont des gaz de l'air atmosphérique, en contact avec la toiture.

Le cuivre vient de la couverture ; $\mathrm{O_2}$, $\mathrm{CO_2}$ et $\mathrm{H_2O}$ viennent de l'air.

COMPRENDRE
Trois des quatre réactifs sont apportés par l'air : leurs atomes se fixent sur le toit. C'est l'idée clé du problème, la couverture s'alourdit en se corrodant.

3 Indiquer, en justifiant, le type de réaction correspondant à l'équation 1 et la nature de la réaction subie par le cuivre. Puis résoudre le problème : estimer la différence de masse de la couverture des trois dômes due à la corrosion du cuivre.

Données utiles épaisseur $e = 100$ nm ; $\rho_{vg} = 4{,}0 \times 10^3$ kg · m^{-3} ; $S = \frac{3}{2}\pi R^2$; $S_s = 2\pi r^2$; masses molaires atomiques ; plan à l'échelle

Question 3. L'équation 1 met en jeu un transfert d'électrons du cuivre vers le dioxygène : c'est une réaction d'**oxydoréduction**. Le cuivre cède des électrons, il subit une **oxydation** ($\mathrm{Cu} \longrightarrow \mathrm{Cu}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^-$) ; le dioxygène est réduit.

Problème. D'après le bilan, le cuivre du vert-de-gris était déjà dans la toiture. La masse gagnée est celle des atomes C, H et O venus de l'air.

Rayons. Sur le plan, le segment « 20 m » mesure 2,0 cm : 1 cm représente 10 m. Diamètre du grand dôme : 3,9 cm, soit $R \approx 20$ m. Diamètre d'un dôme latéral : 1,9 cm, soit $r = 9{,}5$ m.

Surface des trois dômes.

$$S_T = \tfrac{3}{2}\pi R^2 + 2 \times 2\pi r^2 = \tfrac{3}{2}\pi \times 20^2 + 4\pi \times 9{,}5^2 = 3{,}0 \times 10^3 \text{ m}^2$$

Masse de vert-de-gris. Le volume de la couche est $V = S_T \times e$, avec $e = 100 \times 10^{-9}$ m :

$$m_{vg} = \rho_{vg}\, S_T\, e = 4{,}0 \times 10^3 \times 3{,}0 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-9} = 1{,}2 \text{ kg}$$

Part venue de l'air. $M_{vg} = 2 \times 63{,}5 + 12{,}0 + 2 \times 1{,}0 + 5 \times 16{,}0 = 221{,}0$ g · mol^{-1}, dont $221{,}0 - 2 \times 63{,}5 = 94{,}0$ g · mol^{-1} hors cuivre.

$n_{vg} = \dfrac{m_{vg}}{M_{vg}} = \dfrac{1{,}2 \times 10^3}{221{,}0} = 5{,}5$ mol, d'où $\Delta m = n_{vg} \times 94{,}0 = 5{,}1 \times 10^2$ g.

Regard critique. Cela représente moins de 0,2 g par mètre carré : la couche, très fine, alourdit la toiture de façon négligeable.

La couverture des trois dômes s'est alourdie d'environ $\Delta m \approx 0{,}5$ kg.

PIÈGE
Annoncer 1,2 kg : c'est la masse de vert-de-gris, cuivre compris. Or ce cuivre appartenait déjà au toit. Autre erreur fréquente : laisser l'épaisseur en nanomètres, alors que $100\ \text{nm} = 1{,}00 \times 10^{-7}$ m.

COMPRENDRE
Les mesures au millimètre sur le plan et la masse volumique « estimée » ne justifient qu'un ou deux chiffres significatifs : on attend un ordre de grandeur, pas une valeur précise. Garder les valeurs non arrondies en mémoire pendant les calculs.

COMPRENDRE
La corrosion des matériaux relevait de l'enseignement de spécialité d'avant 2021 et n'est plus étudiée en tant que telle. L'oxydoréduction, la masse volumique et le bilan de matière utilisés ici restent au programme actuel.

À LA CALCULATRICE

