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 :

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

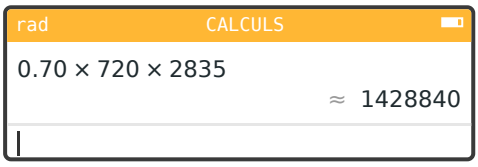
$P_{\text{réfl}} = 0{,}70 \times 720 \times 2835 = 1{,}43 \times 10^6\ \text{W}$

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

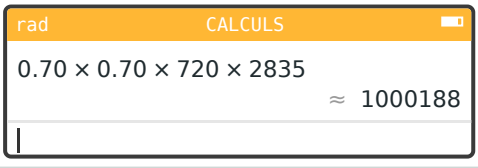
$$P_{\text{foyer}} = r \times P_{\text{réfl}} = r^2 \times p \times S_h$$

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

$P_{\text{foyer}} = 1{,}00 \times 10^6$ 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.

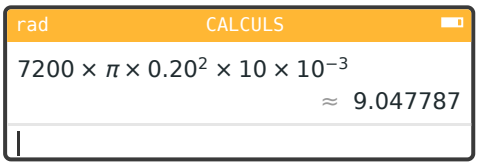
$$m = \rho \times V = \rho \times \pi R^2 e$$

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

$m = 9{,}0$ 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 :

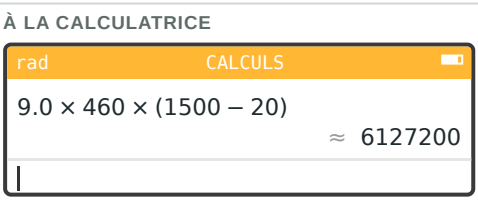
$$E_1 = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

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

$E_1 = 6{,}1 \times 10^6$ 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) ; $L_f = 2{,}50 \times 10^5\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; $E = m \times L_f$

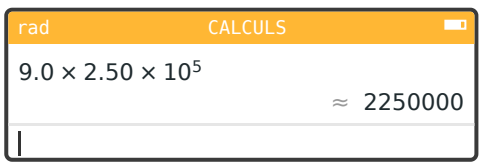
À $1500\ °C$, la fusion se fait à température constante :

$$E_2 = m \times L_f$$

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

$E_2 = 2{,}3 \times 10^6$ 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 :

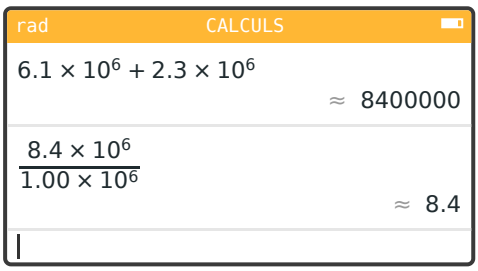
$$\Delta t = \frac{E}{P_{\text{foyer}}}$$

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

$\Delta t_{\text{théo}} = 8{,}4$ 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



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

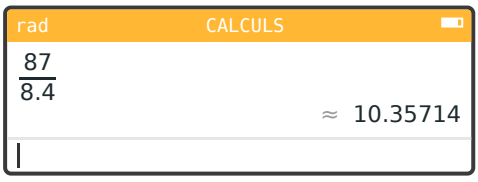
Durée expérimentale : $\Delta t_{\text{exp}} = 60 + 27 = 87$ s.

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

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



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.