

CORRIGE

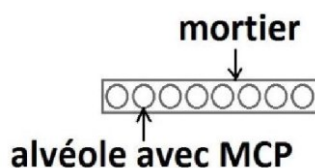
Partie A – La conception du bâtiment

Les matériaux constituant les différents éléments d'un BEPOS sont minutieusement choisis pour assurer une bonne isolation. On étudie le choix des éléments suivants :

- le matériau à changement de phase contenu dans les dalles de mortier ;
- les fenêtres.

A.1. Le Matériau à Changement de Phase (MCP) des dalles de mortier

Les plafonds et planchers seront construits avec des dalles de mortier dont les alvéoles contiennent un MCP.



Les MCP très utilisés dans le bâtiment sont à base de paraffines ; le choix, qui dépend entre autres de la température de changement d'état solide-liquide et de l'enthalpie de fusion, doit se faire entre l'heptadécane $C_{17}H_{36}$ et l'octadécane $C_{18}H_{38}$.

On dispose de tous les renseignements nécessaires concernant l'octadécane ; par contre, pour l'heptadécane, il faut déterminer expérimentalement la température de changement d'état solide-liquide et l'enthalpie de fusion.

A.1.1. Les MCP à base de paraffines sont des matériaux organiques. Pourquoi sont-ils qualifiés d'organiques ?

Ce sont des hydrocarbures, molécules constituées de carbone et d'hydrogène : ce sont donc des molécules organiques.

A.1.2. En utilisant le document A1, expliquer brièvement pourquoi un MCP permet de limiter les besoins en chauffage.

D'après le document A1 : Les Matériaux à Changement de Phase MCP ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie. De l'énergie est absorbée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et elle est restituée lors du passage inverse.[...].

Donc lorsque la température augmente, ils stockent de l'énergie qu'ils restituent lorsque la température baisse : on a donc besoin de moins chauffer.

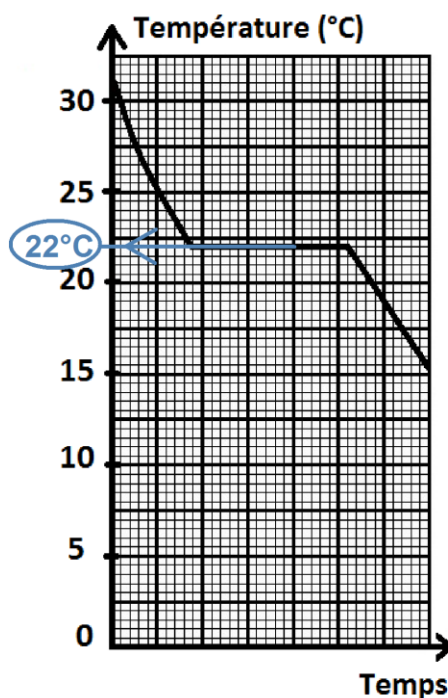
A.1.3. On détermine dans un premier temps la température de changement d'état solide-liquide de l'heptadécane.

A.1.3.1. Expliquer ce qui a lieu au niveau microscopique lors de la solidification de l'heptadécane.

Lors de la solidification, l'agitation des molécules d'heptadécane diminue. Elles adoptent une structure ordonnée.

A.1.3.2. En utilisant le document A2, déterminer la température de changement d'état solide-liquide de l'heptadécane.

La température de changement d'état correspond au palier de température, soit ici, 22 °C.



A.1.4. L'enthalpie de fusion de l'heptadécane est déterminée expérimentalement suivant le protocole décrit dans le document A3.

A.1.4.1. En exploitant les résultats du document A3, effectuer un bilan énergétique pour en déduire l'enthalpie de fusion de l'heptadécane. Vérifier que la valeur obtenue est $H_f = 2,35 \cdot 10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

D'après les résultats, pour faire fondre 15,0 g d'heptadécane, il faut $3,52 \cdot 10^3 \text{ J}$.

Donc pour faire fondre 1 kg = 1000 g d'heptadécane, il faut $\frac{3,52 \cdot 10^3 \times 1000}{15} = 2,35 \cdot 10^5 \text{ J}$.

Donc on a bien $H_f = 2,35 \cdot 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$ soit $H_f = 2,35 \cdot 10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$

A.1.4.2. Dans les conditions de l'expérience précédente, on admet que l'incertitude U_{H_f} de l'enthalpie H_f de fusion est telle que : $\frac{U_{H_f}}{H_f} = \frac{U_{E_{\text{eau}}}}{E_{\text{eau}}}$ où $U_{E_{\text{eau}}} = 0,4 \cdot 10^3 \text{ J}$ et $E_{\text{eau}} = 3,53 \cdot 10^3 \text{ J}$.

A.1.4.2.1. Citer deux sources d'erreurs possibles dans cette expérience.

- On a supposé que le calorimètre ne participait pas aux échanges thermiques, ce qui est vraisemblablement faux,
- mauvais « essuyage » du morceau d'heptadécane,
- Mauvaise pesée de l'heptadécane,
- La précision sur les mesures des masses et des températures.

A.1.4.2.2. Calculer avec un chiffre significatif l'incertitude de mesure UH_f de l'enthalpie de fusion de l'heptadécane.

$$\text{On a : } \frac{UH_f}{H_f} = \frac{UE_{\text{eau}}}{E_{\text{eau}}} = \frac{0,4 \times 10^3}{3,53 \times 10^3} = 0,113$$

$$\text{Donc : } UH_f = \frac{UH_f}{H_f} \times H_f = 0,113 \times 2,35 \cdot 10^2 = 2,66 \cdot 10^1 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Donc, avec un seul chiffre significatif : $UH_f = 3 \cdot 10^1 \text{ kJ.kg}^{-1}$

A.1.4.2.3. On présente souvent un résultat de mesure sous la forme d'un intervalle encadrant la valeur exacte avec une probabilité de 95%. Les limites de l'intervalle sont :

- valeur minimale = résultat de la mesure – 2 x l'incertitude calculée ;
 - valeur maximale = résultat de la mesure + 2 x l'incertitude calculée.
- Calculer les valeurs encadrant la mesure de l'enthalpie de fusion.
- **Valeur minimale : $2,35 \cdot 10^2 - 2 \times 3 \cdot 10^1 = 1,7 \cdot 10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$**
 - **Valeur maximale : $2,35 \cdot 10^2 + 2 \times 3 \cdot 10^1 = 2,9 \cdot 10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$**

A.1.5. Voici les renseignements trouvés pour l'octadécane, qui est l'autre matériau à changement de phase proposé par le chef de projet :

- la température de changement d'état solide-liquide : 28°C
- l'enthalpie de fusion : $H_{f \text{ octadécane}} = 244 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

Quel MCP conseillez-vous ? Justifier votre réponse.

D'après le document A1, la température doit être comprise entre 18 et 28°C, de ce point de vue, les deux matériaux peuvent convenir.

Les deux enthalpies de fusion sont comparable (compte tenu de l'incertitude sur la mesure de l'enthalpie de fusion de l'heptadécane). On ne peut donc pas choisir entre les deux sur ce critère.

Si on considère que l'enthalpie de fusion de l'octadécane est supérieure à celle de l'heptadécane : pour la même masse de matière, l'octadécane emmagasinera plus d'énergie, c'est donc lui qu'il faut choisir. (Sauf si on est dans une région où l'on atteint rarement la température de 28°C...)

A.2. Les fenêtres

Pour les fenêtres, les deux modèles présentés dans le document A4 ont été sélectionnés pour finaliser le choix. Une étude est effectuée pour une fenêtre de surface 1 m^2 .

A.2.1. En exploitant les documents A4 et A5, calculer la résistance thermique $R_{\text{th, triple}}$ d'une surface de 1 m^2 du triple vitrage avec lames d'air.

D'après le document A5 : lorsque plusieurs parois sont accolées, la résistance thermique totale est égale à la somme des résistances thermiques.

On additionne donc les résistances thermiques des trois lames de verre et des deux lames d'air :

$$R_{\text{th, triple}} = 3 \times R_{\text{th}}(\text{verre } 4\text{mm}) + 2 \times R_{\text{th}}(\text{air } 12\text{mm}) = 3 \times 3,3 \cdot 10^{-3} + 2 \times 0,46 = 0,93 \text{ K.W}^{-1}.$$

A.2.2. Faut-il plutôt choisir la fenêtre double vitrage à lame de krypton ou la fenêtre triple vitrage à lames d'air ? Justifier à l'aide des documents A4 et A5.

D'après le document A5 : la résistance thermique R_{th} donne une indication sur les propriétés isolantes d'un matériau : plus elle est élevée, plus le matériau est isolant.

La résistance thermique de la fenêtre au Krypton est supérieure à celle du triple vitrage, il est donc préférable de choisir la fenêtre au Krypton.

Partie B – L'intégration des énergies renouvelables

Pour respecter la loi Grenelle 1 du 3 août 2009, la production annuelle d'énergie renouvelable du bâtiment BEPOS doit être supérieure à la consommation annuelle d'énergie non renouvelable, qui est estimée pour ce projet à 66 MW.h (Mégawattheure).

Pour assurer cette production, on envisage d'installer des panneaux solaires et deux éoliennes.

B.1. Panneaux solaires

Des panneaux solaires photovoltaïques doivent couvrir une surface de 98 m^2 .

B.1.1. Sous quelle forme d'énergie utile le panneau photovoltaïque transforme-t-il l'énergie solaire ?

Le panneau photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique.

B.1.2. Dans le projet, les panneaux solaires photovoltaïques doivent contenir du silicium polycristallin.

B.1.2.1. En utilisant le document B1, calculer l'énergie minimale qu'un photon doit posséder pour « arracher » un électron du réseau du silicium. Exprimer le résultat en joule.

Donnée. $1,0 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

D'après le document B1, l'énergie du photon doit au moins être égale à 1,12 eV.

Soit : $1,12 \times 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

- B.1.2.2.** Sachant que la vitesse d'une onde électromagnétique dans l'air est $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, montrer que la longueur d'onde λ de l'onde associée à ce photon est $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Donnée. $E = h \cdot \nu$ où E est l'énergie du photon qui s'exprime en joule (J), h est la constante de Planck égale à $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ et ν la fréquence de l'onde associée qui s'exprime en hertz (Hz).

On a $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

Donc $\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^{-19}} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

- B.1.2.3.** D'après le document B2, à quel domaine du spectre solaire ce photon appartient-il ?

$\lambda = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1,1 \cdot 10^3 \text{ nm}$: il s'agit d'infrarouge (IR-A).

- B.1.2.4.** Sachant que chaque panneau photovoltaïque, de surface égale à $1,65 \text{ m}^2$, peut produire une puissance maximale de 235 W, calculer la puissance maximale que peuvent fournir les 98 m^2 de panneaux photovoltaïques que l'on envisage d'installer sur le toit.

Si $1,65 \text{ m}^2$ de panneau peut produire 235 W, alors 98 m^2 de panneaux peut fournir :

$$\frac{98 \times 235}{1,65} = 1,39 \cdot 10^4 \text{ W}$$

Soit $1,4 \cdot 10^4 \text{ W}$ avec 2 chiffres significatifs (comme dans la donnée 98 m^2)

- B.1.2.5.** En considérant un ensoleillement de 12 h en moyenne par jour, on montre que ces panneaux photovoltaïques peuvent produire une énergie de $2,2 \cdot 10^{11} \text{ J}$ en une année. Vérifiez que ce résultat est correct.

Données. $E = P \cdot \Delta t$ avec P la puissance exprimée en watt (W), Δt la durée exprimée en seconde (s) et E l'énergie en joule (J).

Le panneau fonctionnera pendant 12 h (de 3600 s) par jour pendant 365,25 j :

$$E = P \cdot \Delta t = 1,39 \cdot 10^4 \times 12 \times 365,25 \times 3600 = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ J}$$

- B.1.3.** Le chef de projet espère qu'avant la date limite de dépôt du dossier, un autre type de panneaux solaires plus performant sera commercialisé : les panneaux photovoltaïques triple jonctions. Ils remplaceront alors ceux qui étaient prévus.
En utilisant le document B1, expliquer pourquoi les panneaux photovoltaïques triple jonctions sont plus performants que les panneaux photovoltaïques au silicium polycristallin.

Le panneau silicium polycristallin n'absorbe que 20% des radiations visibles et IR.

Le panneau triple jonction absorbe 20% des radiations visibles, mais 40% des radiations IR (deux fois plus) et en plus, il absorbe 55% rayonnement UV.

B.2. Les éoliennes

Le bâtiment doit être équipé de deux éoliennes dont la description générale est indiquée dans le document B3.

B.2.1. Les pales d'une éolienne en rotation sont soumises à plusieurs actions mécaniques, dont celle exercée par le vent et le poids.

B.2.1.1. Citer une troisième action mécanique qui s'exerce sur la pale d'une éolienne en rotation.

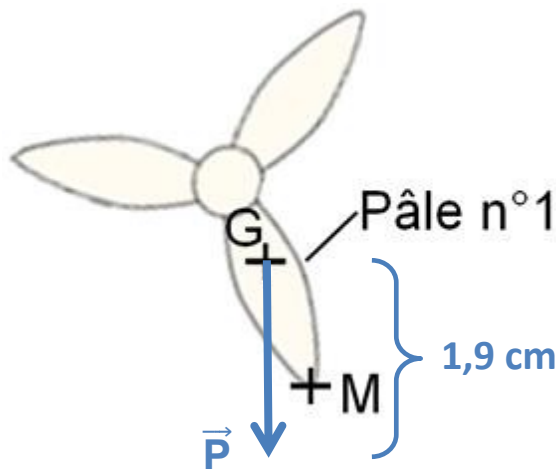
La force exercée par le rotor sur l'éolienne.

B.2.1.2. Sur l'**annexe 1 à rendre avec la copie**, modéliser le poids de la pale n°1, sachant que sa valeur vaut 7600 N. Le point M est situé à l'extrémité de la pale et le point G le centre de gravité de la pale.
Échelle : 1,0 cm représente 4000 N.

Le poids est une force verticale dirigée vers le bas qui s'applique au centre de gravité G de la pale.

À l'échelle 1,0 cm représente 4000 N, on le représente par un vecteur de :

$$\frac{7600}{4000} = 1,9 \text{ cm}$$



B.2.1.3. L'action du vent peut être modélisée par deux forces :

- la portance $\vec{F}_{\text{portance}}$, qui permet de faire tourner le rotor ;
- la trainée $\vec{T}$, qui est une résistance aérodynamique dont la valeur est donnée par la relation : $T = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2$

C_x est le coefficient de trainée ; il n'a pas d'unité.

ρ est la masse volumique de l'air ; elle s'exprime en kg.m^{-3} .

S est la surface balayée par les pales de l'éolienne ; elle s'exprime en m^2 .

v est la vitesse du vent ; elle s'exprime en m.s^{-1} .

À partir des unités des grandeurs physiques, vérifier que la trainée est une force.

$T = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$ s'exprime en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ soit en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, ce qui correspond à des newton.

(on peut s'en assurer avec le poids $P = m \cdot g$ qui s'exprime en newton, lorsque m est en kg et g en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Donc T est bien une force

B.2.2. Lorsque la vitesse du vent est suffisante, les pales se mettent en mouvement ; elles exercent alors un couple de forces plus ou moins important sur le rotor.

B.2.2.1. Calculer la valeur C du moment du couple de forces exercé par les pales de l'éolienne, lorsqu'elles effectuent un tour complet.

*Données : travail d'un couple de forces = moment du couple en $\text{N} \cdot \text{m}$ * angle de rotation en rad.*

Travail du couple $W = 2,0 \cdot 10^2 \text{ J}$; 1 tour = $2\pi \text{ rad} = 360^\circ$

D'après les données ci-dessus, on a $W = C \times \theta$ donc $C = \frac{W}{\theta} = \frac{2,0 \cdot 10^2}{2\pi} = 32 \text{ N} \cdot \text{m}$

B.2.2.2. En déduire la valeur de la puissance mécanique P d'une éolienne lorsque la vitesse angulaire ω vaut 1500 tr/min.

Donnée. $P = C \cdot \omega$

P est la puissance mécanique, exprimée en watt (W), C est le moment du couple exprimé en unité $\text{N} \cdot \text{m}$ et ω est la vitesse angulaire exprimée en radian par seconde ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

Il faut convertir ω en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$: $1500 \text{ tr/min} = \frac{1500 \times 2\pi}{60} = 157 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

$P = C \cdot \omega = 32 \times 157 = 5,0 \cdot 10^3 \text{ W}$

B.3. Bâtiment BEPOS

La consommation annuelle du bâtiment est estimée à 66 MW.h. Le bâtiment sera équipé :

- de deux éoliennes ; pour chaque éolienne, la durée moyenne de fonctionnement et la vitesse moyenne du vent permettent d'estimer que l'énergie électrique produite est de $8,0 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$;
- de panneaux solaires, qui fourniront $2,2 \cdot 10^{11} \text{ J}$.

Pensez-vous que le bâtiment entrera bien dans la catégorie BEPOS ? Justifier.

Donnée. Équivalence entre wattheure ($W \cdot h$) et joule (J) : $1,0 \text{ W} \cdot h = 3,6 \text{ kJ}$.

Les deux éoliennes pourront produire $2 \times 8,0 \cdot 10^3 = 16 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h} = 16 \text{ MW} \cdot \text{h}$

Les panneaux solaires fourniront $2,2 \cdot 10^{11} \text{ J}$, soit $\frac{2,2 \cdot 10^{11}}{3600} = 6,1 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{h} = 61 \text{ MW} \cdot \text{h}$

Ce qui fait un total de $77 \text{ MW} \cdot \text{h} > 66 \text{ MW} \cdot \text{h}$

La production est bien supérieurs à la consommation, donc le bâtiment entrera bien dans la catégorie BEPOS.

Partie C - L'utilisation de l'hydrogène, un vecteur énergétique

Compte tenu de ses équipements en énergies renouvelables, la production d'électricité varie au cours de l'année. En juillet, mois d'ensoleillement important et assez venté, la production dépasse largement la consommation. Au contraire, en février, elle est inférieure à la consommation.

Comme l'électricité produite en surplus ne peut pas être stockée, elle sera utilisée pour produire du dihydrogène H_2 , qui sera stocké dans des récipients adaptés.

Lorsque des besoins apparaîtront, le dihydrogène stocké alimentera alors une pile à hydrogène : l'énergie libérée servira pour le chauffage et l'électricité alimentera le bâtiment (chauffage électrique d'appoint, éclairage, ...).

C.1. Le stockage du dihydrogène

Le dihydrogène, substance inflammable et explosive, sera stocké dans les locaux du bâtiment. Pour des raisons d'encombrement, il sera comprimé sous une pression très élevée dans des réservoirs adaptés.

C.1.1. Quel instrument de mesure permettra de contrôler la pression du dihydrogène dans les réservoirs de stockage ?

On utilise un manomètre ou un pressiomètre pour mesurer la pression d'un gaz.

C.1.2. Quels pictogrammes devront être apposés sur ces réservoirs ?

Pictogramme 1	Pictogramme 2	Pictogramme 3	Pictogramme 4	Pictogramme 5	Pictogramme 6
					

Les réservoirs contiendront un gaz sous pression, il faudra le pictogramme 4 ;

Le dihydrogène est inflammable, il faudra le pictogramme 2

Le dihydrogène est explosif, il faudra le pictogramme 1

C.2. La pile à combustible

Lorsque le bâtiment aura besoin d'électricité, il fera fonctionner sa pile à combustible, alimentée par le dihydrogène stocké.

En utilisant le document C1, répondre au questionnaire à choix multiple figurant sur l'**annexe 2 à rendre avec la copie** en cochant la bonne réponse.

Les porteurs de charge qui se déplacent dans l'électrolyte de la pile sont :

- ☐ Des photons
- ☐ Des électrons
- ☒ **Des ions**

L'équation de la réaction qui a lieu à la cathode s'écrit :

- ☐ $O_2 (g) + 4 H^+_{(aq)} = 2 H_2O_{(l)} + 4 e^-$
- ☐ $2 H_2O_{(l)} = O_2 (g) + 4 H^+_{(aq)} + 4 e^-$
- ☒ **$O_2 (g) + 4 H^+_{(aq)} + 4 e^- = 2 H_2O_{(l)}$ (c'est une réduction qui se produit à la cathode)**

Le couple oxydant / réducteur mis en jeu à l'anode s'écrit :

- ☐ $H_2 (g) / H^+_{(aq)}$

☒ $\text{H}^+_{(\text{aq})} / \text{H}_{2(\text{g})}$

☐ $\text{H}_{2(\text{g})} / \text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$

Pour la réaction de fonctionnement de la pile à hydrogène, le réducteur est :

☐ Le dioxygène

☒ **Le dihydrogène**

☐ L'eau

La réaction qui a lieu à l'anode est :

☐ Une combustion

☐ Une réduction

☒ **Une oxydation**

C.3. L'impact environnemental

Comme la production et le stockage du dihydrogène sont coûteux, on propose que les besoins en chauffage soient compensés par une petite chaudière à condensation.

C.3.1. La consommation annuelle de propane de cette chaudière s'élèverait à $1,3 \cdot 10^5$ mol de propane. Déterminer la quantité de matière de dioxyde de carbone qui serait produite en une année.

Donnée. L'équation de la réaction chimique de la combustion du propane ayant lieu dans la chaudière s'écrit : $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{g})} + 5 \text{O}_{2(\text{g})} \rightarrow 3 \text{CO}_{2(\text{g})} + 4 \text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$

D'après l'équation ci-dessus, 1 mole de propane produit 3 moles de CO_2 .

Donc, en consommant $1,3 \cdot 10^5$ moles de propane, la chaudière va produire :

$3 \times 1,3 \cdot 10^5 = 3,9 \cdot 10^5$ moles de CO_2 en 1an

C.3.2. En déduire la masse de dioxyde de carbone CO_2 qui serait rejetée dans l'atmosphère.
Donnée Masse molaire moléculaire du dioxyde de carbone : $M = 44,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

$m = n \times M = 3,9 \cdot 10^5 \times 44,0 = 1,7 \cdot 10^7 \text{ g}$

C.3.3. Les émissions de dioxyde de carbone ont un impact environnemental : elles contribuent à l'augmentation de l'effet de serre. En exploitant le document C2, indiquer un autre impact environnemental.

Dans le document C2, on peut voir que lorsqu'il se dissout dans l'eau, il y a production d'ion H^+ qui sont responsable de l'acidité des solutions.

Il contribue à l'acidification des océans.

C.3.4. Quel inconvénient présente la chaudière à condensation par rapport à la pile à hydrogène ?

La chaudière à condensation rejette du dioxyde de carbone, la pile à hydrogène, non.

C.4. Valorisation du surplus d'énergie

Une partie du dihydrogène stocké sera utilisée pour subvenir aux besoins en électricité du bâtiment à certains moments. On se propose d'utiliser le surplus de dihydrogène, estimé à $8,4 \cdot 10^4$ mol, pour alimenter un véhicule électrique.

Une telle acquisition serait rentable si la quantité de matière de dihydrogène disponible était au moins égale à 70% des besoins du véhicule.

Sachant que le véhicule envisagé devra parcourir 20 000 km par an, est-il rentable de l'acquérir ? Vous expliquerez clairement les étapes de votre démarche.

Données.

- Le volume molaire d'un gaz est le volume occupé par une mole de ce gaz.
 - Volume molaire du dihydrogène dans les conditions de stockage : $V_m = 3,5.10^{-2} \text{ L.mol}^{-1}$
 - Le volume de dihydrogène embarqué à bord d'une voiture est estimé à 150 L dans les conditions de stockage.
 - L'autonomie du véhicule est estimée à 500 km.
- Avec 150 L de gaz, le véhicule parcourt 500 km.
- Donc pour parcourir 20000 km, il faudra $\frac{20000 \times 150}{500} = 6\,000 \text{ L}$ de dihydrogène.
- D'après le volume molaire, 1 mol de gaz occupe $3,5.10^{-2} \text{ L}$, donc 6000 L de gaz correspond à $\frac{6000 \times 1}{3,5.10^{-2}} = 1,7.10^5 \text{ mol}$.

70 % des besoins correspondent à $0,7 \times 1,7.10^5 = 1,2.10^5 \text{ mol}$

Or on ne dispose que de $8,4.10^4$ moles de gaz, le véhicule n'est pas rentable.

Rq : On peut faire le calcul suivant : $\frac{8,4.10^4}{1,7.10^5} = 0,49 = 49 \%$

La quantité disponible de gaz ne correspond qu'à 49 % des besoins, soit moins de 70 %.