

# Concours Blanc Physique-Chimie - 13 Mai 2026 - 4h

- L'usage de la calculatrice est interdit.
- Un résultat d'application numérique **ne doit pas** contenir d'opérations ou de fonctions (fraction, racine, logarithme, etc.) et sera compté **comme faux** s'il en contient.
- Les expressions littérales seront encadrées, et les applications numériques soulignées. **Une application numérique sans unité sera considérée fautive.**
- Les parties et sous-parties sont indépendantes, elles seront néanmoins à restituer **dans l'ordre** sur votre copie.
- Si vous constatez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, indiquez-le sur votre copie. Vérifiez tout de même que l'erreur ne provient pas de vous (homogénéité, ordre de grandeur, etc.).

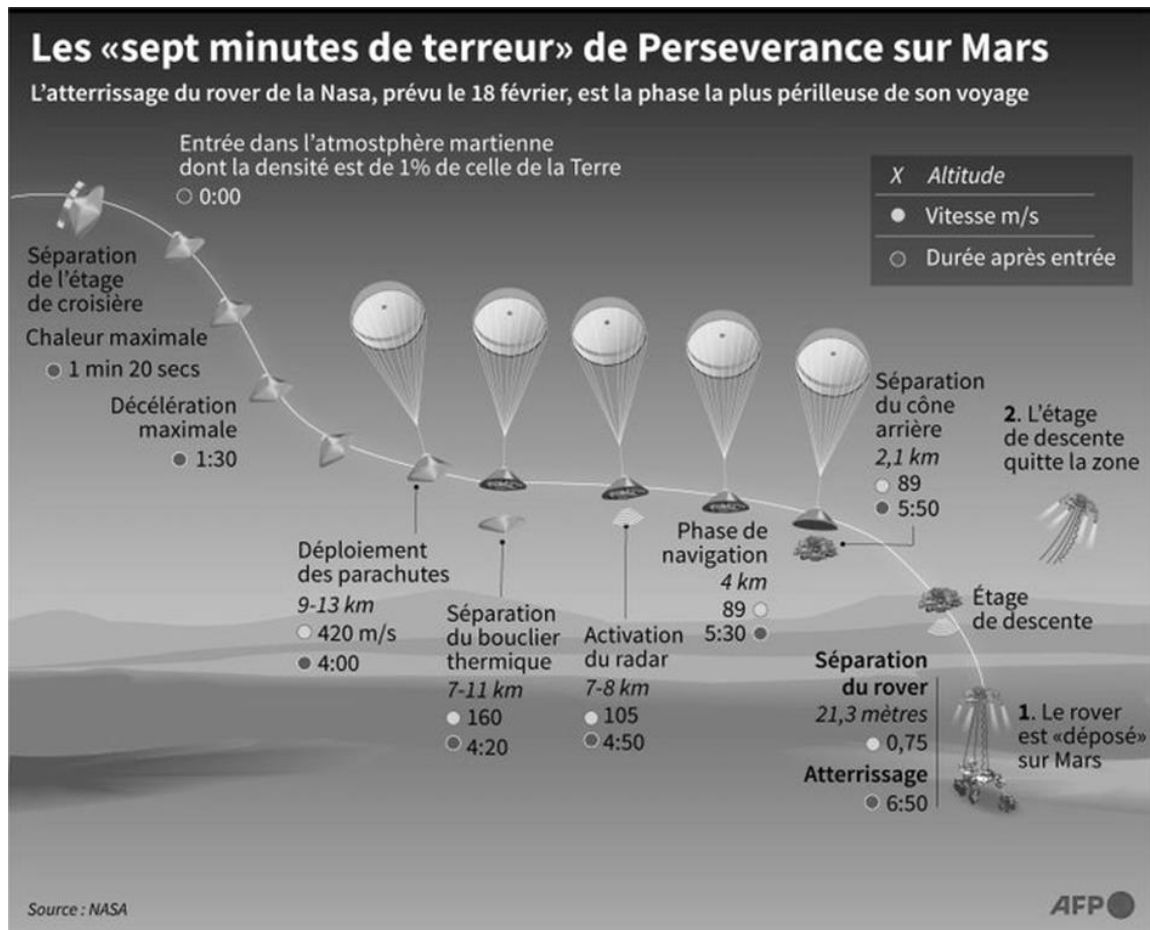
## L'exploration martienne

Au cours du siècle dernier, de très nombreux auteurs de science-fiction ont écrit autour de l'exploration de la planète Mars et de ce que nous pourrions y découvrir. C'est certainement un jour au cours de ce siècle, que l'homme foulera le sol martien comme Neil Armstrong l'a fait pour la Lune le 21 juillet 1969. Dans l'attente de ce grand jour, ce sont des robots qui nous précèdent.

### Partie I – Perseverance

Lancé depuis la Terre le 30 juillet 2020 grâce à un lanceur Atlas V, le rover Perseverance a atterri sur la planète Mars le 18 février 2021. Le site d'atterrissage, le cratère Jezero, est une zone présentant une grande diversité géologique et ayant abrité un lac il y a environ 3,6 milliards d'années. Un des enjeux de cette mission est le prélèvement d'échantillons destinés à être analysés sur Terre afin de détecter d'éventuelles traces d'une vie passée.

#### Document 1 – Atterrissage de Perseverance



Source : www.cnes.fr

## I.1 – L'atterrissage

### Aide au calcul :

$$420^2 \approx 1,8 \cdot 10^5 \quad 160^2 \approx 2,6 \cdot 10^4 \quad 420^2 - 160^2 \approx 1,5 \cdot 10^5 \quad 3 \times 3,7 \times 3,1 \approx 34$$

La sonde spatiale Mars 2020, de masse  $m$ , pénètre dans l'atmosphère martienne à la vitesse de  $12\,000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (vitesse mesurée par rapport au sol), elle larguera le rover 7 minutes plus tard.

Après une première phase de freinage grâce au bouclier thermique, le parachute est déployé à l'altitude d'environ  $10,6 \text{ km}$  et à la vitesse, notée  $v_A$ , de  $420 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

- Q1.** Le point A étant l'endroit où le parachute est déployé, donner l'expression littérale de l'énergie cinétique  $E_c(A)$  de l'ensemble en se limitant à un simple mouvement de translation.

$$\text{Par définition : } E_c(A) = \frac{1}{2}mv_A^2 \quad /1$$

Au bout de 20 secondes, la vitesse n'est plus que de  $160 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et l'altitude de  $7,5 \text{ km}$ , Mars 2020 largue alors son bouclier thermique.

- Q2.** En appelant B le point de largage et en considérant toujours la même masse, exprimer la variation d'énergie cinétique entre les points A et B.

$$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \frac{1}{2}m(v_B^2 - v_A^2) \quad /1$$

- Q3.** Connaissant la masse de la sonde spatiale,  $m = 3,0 \cdot 10^3 \text{ kg}$ , effectuer le calcul de cette variation d'énergie cinétique.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \times 3,0 \cdot 10^3 \times (160^2 - 420^2) = 1,5 \cdot 10^3 \times (-1,5 \cdot 10^5) \approx -2,2 \cdot 10^8 \text{ J} \quad \begin{array}{l} /1 \text{ AN correctement posée} \\ /1 \text{ valeur numérique correcte} \\ \text{(avec U)} \end{array}$$

- Q4.** Énoncer le théorème de l'énergie cinétique.

Pour un point matériel de masse constante étudié dans un référentiel galiléen, sa variation d'énergie cinétique entre deux points est égale à la somme des travaux de toutes les forces qui s'exercent sur lui :  $\Delta E_c = \sum W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$ . /1 allusion au ref galiléen et à la masse cste  
/1 reste de l'énoncé

- Q5.** En supposant l'accélération de la pesanteur martienne uniforme et de valeur  $g = 3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , calculer la valeur du travail du poids entre les points A et B, noté  $W_{AB}(\vec{P})$ .

$$\text{Avec } z \text{ l'altitude : } W_{AB}(\vec{P}) = mg(z_A - z_B) = 3,0 \cdot 10^3 \times 3,7 \times (10,6 - 7,5) \cdot 10^3 = 3,0 \cdot 10^3 \times 3,7 \times 3,1 \cdot 10^3 \approx 3,4 \cdot 10^7 \text{ J} \quad \begin{array}{l} /1 \text{ EL correcte} \\ /1 \text{ AN correctement posée} \\ /1 \text{ valeur numérique correcte} \\ \text{(avec U)} \end{array}$$

- Q6.** Ce travail est-il qualifié de moteur ou de résistant ? Justifier.

Il s'agit d'un travail moteur, car la sonde descend (sens du déplacement identique au sens de la pesanteur), donc  $W_{AB}(\vec{P}) > 0$ . /1

- Q7.** Montrer, à partir des questions **Q4** et **Q5**, que le travail des forces de frottement sur le parachute (dont la résultante sera notée  $\vec{f}$ ) est d'environ  $-2,5 \cdot 10^8 \text{ J}$ .

$$\text{D'après le TEC : } \Delta E_c = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{f}), \text{ donc } W_{AB}(\vec{f}) = \Delta E_c - W_{AB}(\vec{P}) \approx -2,2 \cdot 10^8 - 3,4 \cdot 10^7 \approx -2,5 \cdot 10^8 \text{ J}. \quad \begin{array}{l} /1 \text{ EL à partir du TEC} \\ /1 \text{ valeur numérique (avec U)} \end{array}$$

- Q8.** Dans la suite du sujet, nous nous limiterons à une étude du mouvement en translation verticale. En supposant cette force de frottement  $\vec{f}$  constante, déduire un ordre de grandeur de la valeur de cette force à partir de la question précédente.

Avec  $\vec{f} = c\vec{s}te$ , alors :  $W_{AB}(\vec{f}) = \int_A^B \vec{f} \cdot d\vec{l} = -f \cdot d$  avec  $d = z_A - z_B = 3,1 \cdot 10^3$  m, donc  $f = \frac{2,5 \cdot 10^8}{3,1 \cdot 10^3} \approx 8,1 \cdot 10^4$  N. /1 EL  
/1 valeur numérique (avec U)

En réalité, la résultante des forces de frottement n'est pas constante et dépend de la vitesse du système. Nous considérerons un modèle linéaire pour cette force :  $\vec{f} = -h\vec{v}$ , où  $h$  est le coefficient de frottement fluide et  $\vec{v}$  est le vecteur vitesse.

**Q9.** Soit l'axe ( $Oz$ ), vertical et orienté vers le bas, dont l'origine  $O$  se situe au point d'ouverture du parachute. Réaliser un schéma sur lequel figurent la sonde spatiale matérialisée par son centre de gravité  $G$  à une abscisse  $z$  quelconque après ouverture du parachute, l'axe ( $Oz$ ) et les deux forces s'exerçant sur la sonde.

Schéma avec l'axe  $Oz$  **vers le bas**, le poids  $\vec{P} = mg \vec{u}_z$  vers le bas, et la résultante des forces de frottement  $\vec{f} = -h \dot{z} \vec{u}_z$  (vers le haut puisque  $v = \dot{z} > 0$  : mouvement vers le bas). /1 Axe  $z$  vers le bas + origine + point avec  $z > 0$   
/1 Poids  $\vec{P}$  vers le bas  
/1  $\vec{f}$  vers le haut, avec  $||\vec{P}|| > ||\vec{f}||$

**Q10.** La descente de la sonde peut-elle être qualifiée de chute libre ? Justifier.

Il ne s'agit pas d'une chute libre (pour laquelle le système n'est soumis qu'à la gravité) car une force de frottement fluide s'ajoute ici au poids. /1

**Q11.** À partir de la seconde loi de Newton, établir l'équation différentielle vérifiée par la projection de la vitesse  $v$  de la sonde sur l'axe vertical et la mettre sous la forme :  $\frac{dv}{dt} + Av = B$ , où  $A$  et  $B$  représentent deux constantes dont on précisera les expressions.

Par projection de la seconde loi de Newton selon l'axe ( $Oz$ ) orienté vers le bas :  $m \frac{dv}{dt} = mg - hv$ , soit  $\frac{dv}{dt} + \frac{h}{m}v = g$ . /1 Expression de la 2ème loi de Newton  
/1 Identification de  $A$   
/1 Identification de  $B$   
On a donc :  $A = \frac{h}{m}$  et  $B = g$ .

**Q12.** Sans résoudre l'équation, déduire de la question précédente l'expression de la vitesse limite théorique pouvant être atteinte par la sonde avec cette hypothèse, au bout d'un temps infiniment long.

À  $t \rightarrow \infty$ ,  $\frac{dv}{dt} = 0$ , donc  $Av_\ell = B$ , soit  $v_\ell = \frac{B}{A} = \frac{mg}{h}$ . /1 considération du RS  
/1 identification de  $v_\ell$

Pour pouvoir réussir cette phase périlleuse, l'étage de descente (le sky crane) dispose d'un radar Doppler comportant six antennes dévoilées dès que le bouclier thermique est largué. Le radar peut alors déterminer avec précision la vitesse et l'altitude de la sonde.

La bande Ka (Kurz Above) du spectre électromagnétique est très utilisée dans le domaine des télécommunications spatiales ; on considère une fréquence moyenne de 30 GHz.

**Q13.** Calculer la longueur d'onde dans le vide, notée  $\lambda_0$ , associée à cette fréquence.

Par définition :  $\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{30 \cdot 10^9} = 1,0 \cdot 10^{-2}$  m = 1,0 cm. /1 EL  
/1 AN (avec U)

Lorsque la sonde se trouve à une altitude  $H$ , celle-ci peut être déterminée avec précision grâce à la durée mise par l'onde pour effectuer un aller-retour entre l'antenne d'émission et le sol.

**Q14.** Exprimer l'altitude  $H$  de la sonde en fonction de la durée mise par l'onde pour effectuer cet aller-retour.

L'onde parcourt la distance  $2H$  à la célérité  $c$ , donc :  $\Delta t = \frac{2H}{c}$ , donc /1 EL  
 $H = \frac{c \Delta t}{2}$

**Q15.** À partir de l'infographie du CNES (document 1), estimer le temps  $\Delta t$  écoulé entre l'émission de l'onde par le radar de la sonde et sa réception après réflexion sur le sol martien, au moment de la séparation du bouclier thermique.

D'après le document 1, la séparation du bouclier thermique a lieu pour  $H \in [7 \text{ km}, 11 \text{ km}]$ , soit  $H \approx 9 \text{ km}$ . Donc  $\Delta t = \frac{2H}{c} = \frac{2 \times 9 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ s}$

/1 Identification de la valeur de H  
/1 AN (avec U)

## 1.2 – La communication

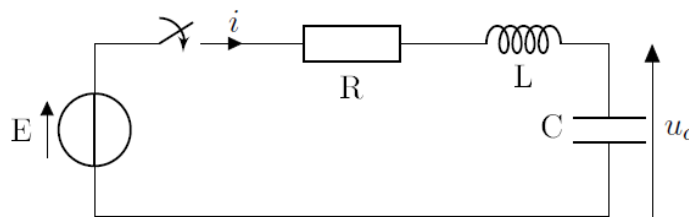
Les rovers peuvent communiquer directement avec la Terre *via* deux antennes à 8 GHz mais aussi avec les sondes orbitales, appelées orbiters et situées à 400 km en orbite autour de Mars. Ces sondes orbitales transmettent les données reçues à la Terre lorsque celle-ci est dans le champ de leur antenne. Ainsi, les rovers économisent de l'énergie.

Bien que la technologie ait évolué considérablement dans ce domaine, historiquement, l'émission et la réception d'ondes ont été possibles grâce à l'association de simples dipôles passifs.

Avant transmission des signaux, il est nécessaire d'étudier l'alimentation de l'antenne émettrice. Même si les circuits utilisés dans la réalité sont plus élaborés, historiquement, on a pu obtenir un courant oscillant grâce à un circuit comprenant une bobine et un condensateur. La tension aux bornes de ce dernier pourra alimenter une antenne émettrice. C'est dans ce contexte que nous étudierons ces dipôles.

On considère ici un circuit RLC schématisé en figure 1. Le condensateur est initialement déchargé et le circuit est alimenté par une source de tension continue notée  $E$ . À  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur.

On considérera les valeurs numériques suivantes :  $R = 2,0 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 10 \text{ nF}$  et  $L = 40 \text{ mH}$ .



**Figure 1** – Circuit RLC alimenté par une tension continue

- Q16.** Déterminer la tension aux bornes du condensateur  $u_c(0^+)$  et l'intensité dans le circuit  $i(0^+)$  juste après la fermeture de l'interrupteur. Justifier.

Le condensateur était initialement déchargé, et la tension à ses bornes est continue, donc :  $u_c(0^+) = u_c(0^-) = 0 \text{ V}$ . La bobine s'oppose à toute variation brusque du courant (l'intensité qui la traverse est continue), et le circuit est initialement ouvert, donc :  $i(0^+) = i(0^-) = 0 \text{ A}$ .

/1 continuité de  $u_c$   
/1 valeur de  $u_c(0^+)$   
/1 continuité de  $i$   
/1 Valeur de  $i(0^+)$

- Q17.** Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur  $u_c(t)$ .

Loi des mailles + loi d'Ohm + relation  $i/u$  de la bobine idéale en convention récepteur :  $E = Ri + L \frac{di}{dt} + u_c$ . Avec  $i = C \frac{du_c}{dt}$  (relation  $i/u$  pour le condensateur idéal en convention récepteur), on obtient :

/1 Loi des mailles  
/1 3 relations  $u/i$  en convention récepteur  
/1 ED

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = E$$

- Q18.** En écrivant cette équation sous la forme canonique :

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du_c}{dt} + \omega_0^2 u_c = \omega_0^2 E,$$

en déduire l'expression de la pulsation propre  $\omega_0$  et du facteur de qualité  $Q$ .

Par identification :

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \text{ donc } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{R}{L} \text{ donc } Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

/1 Identification de  $\omega_0$   
/1 Identification de  $Q$

- Q19.** Déterminer la valeur de la fréquence propre  $f_0$ . Faire l'application numérique à un chiffre significatif (faire l'approximation  $\pi \approx 3$ ).

Par définition :  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$

/1 EL pour  $f_0$   
/1 valeur numérique (avec U)

$$\text{A.N. : } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{40 \cdot 10^{-3} \times 10 \cdot 10^{-9}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4,0 \cdot 10^{-10}}} \approx \frac{1}{6 \times 2 \cdot 10^{-5}} = 8 \cdot 10^3 \text{ Hz} = 8 \text{ kHz.}$$

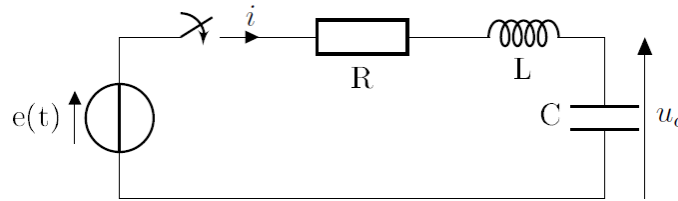
**Q20.** Déterminer la valeur du facteur de qualité  $Q$ . Préciser le régime d'oscillations associé à cette valeur.

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2,0 \cdot 10^3} \sqrt{\frac{40 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-9}}} = \frac{1}{2,0 \cdot 10^3} \sqrt{4,0 \cdot 10^6} = 1,0$$

Comme  $Q > \frac{1}{2}$ , le régime est pseudo-périodique (ou sous-amorti).

/1 AN correctement posée (avec conversions)  
/1 Valeur numérique correcte  
/1 comparaison de  $Q$  à 0,5

On remplace la source de tension continue par une source de tension sinusoïdale  $e(t) = E \cos(\omega t)$  où  $\omega$  désigne la pulsation.



**Figure 2** – Circuit RLC alimenté par une tension variable

**Q21.** Déterminer l'expression de l'impédance  $\underline{Z}_{eq}$  équivalente à l'association en série des trois dipôles R, L et C.

Par association des impédances complexes en série :

/1 Expression de  $\underline{Z}_C$   
/1 Expression de  $\underline{Z}_L$   
/1 Sommation des impédances en série

$$\underline{Z}_{eq} = R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega} = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$$

**Q22.** Sachant que l'intensité dans le circuit s'écrit  $i(t) = I \cos(\omega t + \varphi)$  où  $\varphi$  désigne la phase à l'origine, donner l'écriture complexe de la tension aux bornes du générateur  $\underline{e}$  et de l'intensité dans le circuit  $\underline{i}$ .

Par définition des grandeurs complexes associées aux grandeurs alternatives sinusoïdales en régime sinusoïdal forcé :

/1 Expression de  $\underline{e}$   
/1 Expression de  $\underline{i}$

$$\underline{e} = E e^{j\omega t} \text{ et } \underline{i} = I e^{j(\omega t + \varphi)}$$

**Q23.** Déterminer, grâce aux questions précédentes, l'expression de l'amplitude de l'intensité  $I$  en fonction de  $E$ , R, L, C et de  $\omega$ .

Par généralisation de la loi d'Ohm :  $\underline{e} = \underline{Z}_{eq} \underline{i}$ , donc en passant au module :

/1 Loi d'Ohm en complexe  
/1 Passage au module  
/1 Expression de  $I$

$$I = \frac{E}{|\underline{Z}_{eq}|} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}$$

**Q24.** En déduire l'expression de la fréquence d'oscillations pour laquelle l'amplitude de l'intensité  $I$  qui alimente l'antenne sera maximale. Donner alors l'expression de cette intensité maximale  $I_{max}$  en fonction de  $E$  et de  $R$ .

$$I \text{ est maximale quand } |\underline{Z}_{eq}| \text{ est minimale, soit } L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0 \Rightarrow \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ soit } f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \text{ Alors } I_{max} = \frac{E}{R}.$$

/1 Condition pour maximiser  $I$   
/1 Expression de  $f_0$   
/1 Expression de  $I_{max}$

Dans les questions suivantes, nous allons étudier la transmission d'information directe entre le rover sur Mars et la Terre.

**Q25.** Mars s'éloigne de la Terre à la distance maximale d'environ 300 millions de km. Estimer la durée  $\tau$  nécessaire à un signal radio pour parcourir cette distance. Conclure.

Un signal radio est relatif à une onde électromagnétique qui se propage à la célérité  $c$ . Le retard temporel est donc :  $\tau = \frac{d}{c} = \frac{3 \cdot 10^{11}}{3 \cdot 10^8} = 1.10^3 \text{ s} \approx 17 \text{ min}$ . La communication "en temps réel" est donc impossible.

/1 onde radio = OELMA de célérité  $c$   
 /1 EL du retard temporel  
 /1 Valeur numérique (avec U)  
 /1 Conclusion

Nous pouvons nous demander pourquoi ne pas avoir installé de caméra HD sur le rover. Une image 4K de taille  $4096 \times 2160$  pixels (que l'on pourra approximer à  $4000 \times 2000$  pixels) est codée sur 32 bits par pixel et le débit moyen utilisé pour la transmission est de  $0,25 \text{ Mo}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Q26.** Calculer le poids d'une image 4K en Mo (on prendra  $1 \text{ Mo} = 10^6$  octets).

Nombre de pixels :  $4000 \times 2000 = 8 \cdot 10^6$ . Chaque pixel sur 32 bits = 4 octets.  
 Taille de l'image 4K :  $8 \cdot 10^6 \times 4 = 32 \cdot 10^6 \text{ o} = 32 \text{ Mo}$ .

/1 Conversion 32 bits = 4 o  
 /1 Valeur numérique

**Q27.** Calculer la durée nécessaire pour obtenir une vidéo de 1 seconde avec une cadence de 24 images par seconde envoyée depuis Mars vers la Terre. Commenter.

1 s de vidéo = 24 images  $\times$  32 Mo = 768 Mo. Durée =  $\frac{768}{0,25} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ s} \approx 51 \text{ min}$ . Il faudrait 51 minutes pour envoyer 1 seconde de vidéo 4K, ce qui est totalement réhébitoraire.

/1 Calcul de la taille de la vidéo  
 /1 Calcul de la durée via le débit de transmission  
 /1 Conclusion

## Partie II – L'expérimentation

Le rover Perseverance embarque un certain nombre d'appareils, fruits de la collaboration entre différents pays. Nous allons analyser le fonctionnement de certains d'entre eux.

**Aide au calcul :**

$$\frac{1,4 \times 8,31}{44} \approx 0,26 \quad 6,7^3 \approx 300 \quad 750 \times 8,31 \times 293 \approx 1,8 \cdot 10^6 \quad \sqrt{5,5} \approx 2,4$$

### II.1 – Le spectromètre imageur SuperCam

La SuperCam est une version fortement améliorée de l'instrument franco-américain ChemCam embarqué sur l'astromobile Curiosity. Elle utilise un laser et trois spectromètres pour analyser à distance la composition élémentaire et minérale des roches ciblées. Un microphone, appelé Mars Microphone, est disposé sur la tête optique au sommet du mât du rover. Il enregistre, entre autres, les sons de claquage des étincelles des plasmas produits par le laser qui permettent d'en déduire différents paramètres physiques venant ainsi améliorer l'analyse des spectres LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, que l'on peut traduire par spectroscopie à dégradation induite par laser). Ces sons, souvent appelés de manière imagée « impacts laser », sont audibles jusqu'à une distance de 4 mètres.

**Q28.** L'atmosphère martienne est principalement constituée de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ . Calculer la masse molaire de ce gaz en  $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

$$M(\text{CO}_2) = 12 + 2 \times 16 = 44 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1} = 44 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$$

/1

La thermodynamique permet d'estimer la valeur de la célérité d'une onde sonore dans un gaz parfait par la relation :

$c = \sqrt{\gamma \frac{R}{M} T}$ , où  $\gamma$  est le coefficient adiabatique (que l'on estimera à 1,4),  $R$  la constante des gaz parfaits,  $M$  la masse molaire du gaz et  $T$  la température en kelvin.

**Q29.** Sachant que la température moyenne sur Mars est de  $-63 \text{ }^\circ\text{C}$ , montrer que la valeur de la célérité d'une onde sonore sur Mars est environ égale à  $240 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$c = \sqrt{1,4 \times \frac{8,31}{44 \cdot 10^{-3}} \times (273 - 63)} \approx \sqrt{0,26 \cdot 10^3 \times 210} = \sqrt{55 \cdot 10^4} \approx 2,4 \cdot 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

/1 AN correctement posée (conversions explicitées)  
 /1 Détail du calcul cohérent avec les aides fournies

### Document 2 – Descriptif du laser de SuperCam et ChemCam

Son laser pulsé émet un rayonnement à 1067 nm délivrant environ 15 mJ pour une durée d'impulsion de 5 ns. L'interaction du faisceau laser pulsé de forte puissance avec un matériau provoque un échauffement brutal de la surface éclairée, une vaporisation et une ionisation sous forme d'un plasma. Il est important de comprendre que le plasma se formera si, au niveau de la cible, la puissance par unité de surface (ou l'irradiance) est supérieure à un seuil de  $1,0 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

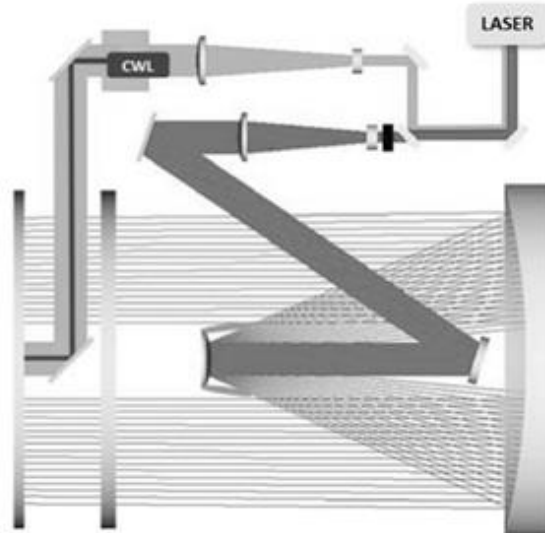
C'est pourquoi SuperCam est pourvue d'un système de focalisation du faisceau laser qui est tel qu'au niveau de la cible le diamètre du faisceau est d'environ  $D = 400 \mu\text{m}$ . Dans ces conditions, les atomes et les ions éjectés sont alors dans des niveaux d'énergie excités. En se désexcitant, ils émettent un rayonnement qui est analysé par spectroscopie entre 250 et 900 nm. On obtient ainsi un spectre d'émission atomique. La détermination des longueurs d'onde de raies présentes sur ce spectre permet d'identifier les atomes ou ions présents dans la cible.

Source : <http://www.msl-chemcam.com/>

Il est nécessaire de faire converger le faisceau laser de diamètre 3,0 mm pour atteindre le seuil de  $1 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$  sur la cible. Le dispositif est schématisé dans le document 3.

À la sortie du laser, on s'intéresse à un doublet afocal (lunette de Galilée renversée) qui élargit le faisceau. Celui-ci est ensuite injecté dans un télescope de type Cassegrain utilisé en émetteur. Le même télescope est aussi utilisé en « récepteur » pour collecter la lumière émise par la cible mais cette partie ne sera pas étudiée.

### Document 3 – Schéma global du télescope



Source : [www.photoniques.com](http://www.photoniques.com), De ChemCam à SuperCam, Cécile Fabre

Le dispositif décrit correspond à un système en configuration afocale qui sera modélisé à l'aide de deux doublets afocaux constitués de lentilles simples positionnées sur un axe optique unique.

La lunette de Galilée renversée est modélisée par une lentille divergente  $L_1$  de distance focale  $f'_1 = -20 \text{ mm}$  suivie d'une lentille convergente  $L_2$  de distance focale  $f'_2 = 100 \text{ mm}$ . Ces deux lentilles constituent le premier doublet afocal : le foyer image de la première lentille coïncide avec le foyer objet de la seconde.

Les lentilles ne limitent pas l'étendue du faisceau. On suppose que le faisceau lumineux incident modélisant le faisceau laser est cylindrique et avec un diamètre de 3,0 mm.

**Q30.** Le système est utilisé dans les conditions de l'approximation de Gauss, ce qui permet un stigmatisme approché. Énoncer ces conditions et définir la notion de stigmatisme.

Conditions de Gauss : rayons peu inclinés et peu éloignés de l'axe optique (rayons paraxiaux).

Stigmatisme : un système optique est stigmatique pour un point objet A si tous les rayons issus de A convergent en un unique point image A'.

/1 faible écartement  
/1 faible inclinaison  
/1 def stigmatisme

**Q31.** Schématiser le modèle optique proposé pour la lunette de Galilée renversée en illustrant la marche du faisceau cylindrique incident (rayons parallèles à l'axe optique) à travers le système des deux lentilles  $L_1$  et  $L_2$ . On prendra soin d'indiquer la position des foyers utiles de chacune des lentilles, ainsi que les centres de celles-ci. On choisira librement une échelle adaptée.

$L_1$  divergente ( $f'_1 = -20$  mm) puis  $L_2$  convergente ( $f'_2 = 100$  mm), les foyers  $F'_1$  et  $F_2$  coïncident. Les rayons entrants parallèles ressortent parallèles (système afocal) avec un faisceau élargi.

- /1 axe optique + deux lentilles correctement identifiées et placées
- /1  $F_2 = F'_1$
- /1 échelle précisée et respectée
- /1 tracé du faisceau

**Q32.** Dans cette configuration, calculer le diamètre du faisceau à la sortie de la lunette de Galilée renversée.

Le théorème de Thalès dans le triangle ( $F_2O_1O_2$ ) permet d'obtenir la relation du grossissement angulaire du doublet afocal :

$$G = \frac{D_{\text{sortie}}}{D_{\text{entrée}}} = \frac{f'_2}{|f'_1|} = \frac{100}{20} = 5,0$$

Le diamètre du faisceau considéré est donc multiplié par  $G = 5,0$ , soit :  
 $D_{\text{sortie}} = 3,0 \times 5,0 = 15$  mm

- /1 Relation géométrique impliquant les distances focales
- /1 Valeur numérique du diamètre de sortie

**Q33.** En utilisant le document 2, déterminer la puissance par unité de surface minimale à envoyer en entrée du dispositif pour qu'une ionisation soit possible en sortie.

SI CE DOUBLET OPTIQUE ETAIT UTILISE DANS L'AUTRE SENS, il multiplierait par  $5^2 = 25$  la puissance par unité de surface, et il faudrait donc  $\frac{1 \cdot 10^9}{25} = 40$  MW/cm<sup>2</sup> en entrée pour espérer l'ionisation de la cible. Dans le sens décrit par le document 3 et le texte, la puissance est divisée par 25 il faudrait donc 25GW/cm<sup>2</sup> en entrée.

- /1 Penser au carré
- /1 Valeur numérique

## II.2 – MOXIE (les PTSI ne traiteront que les questions Q38→Q40)

Mars Oxygen ISRU Experiment, littéralement « expérience d'utilisation in situ des ressources en oxygène de Mars », ou MOXIE, est un instrument du rover Perseverance. Il est destiné à démontrer la faisabilité de la production de dioxygène sur Mars par électrolyse à oxyde solide, appelée SOEC en anglais, du dioxyde de carbone qui constitue 95 % de l'atmosphère martienne. Le 20 avril 2021, MOXIE a produit un total de 5,4 g de dioxygène en une heure, ce qui peut permettre à un astronaute de respirer normalement pendant une dizaine de minutes. MOXIE aspire, compresse et chauffe les gaz atmosphériques martiens au travers d'un filtre, d'un compresseur à spirale et d'éléments chauffants isolés thermiquement, puis scinde le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> en dioxygène O<sub>2</sub> et monoxyde de carbone CO par électrolyse à oxyde solide. Une SOEC présente le fonctionnement inverse d'une pile à combustible à oxyde solide, appelée SOFC. Nous commencerons par l'étude d'une pile électrochimique classique pour comprendre le principe de fonctionnement de la pile à combustible, puis du module d'électrolyse MOXIE.

La pile classique considérée est constituée de demi-piles séparées par un pont salin : une électrode de zinc solide plongeant dans une solution ionique contenant les ions Zn<sup>2+</sup><sub>(aq)</sub> et une électrode de cuivre solide plongeant dans une solution ionique contenant les ions Cu<sup>2+</sup><sub>(aq)</sub>.

**Q34.** Réaliser un schéma de la pile électrochimique classique précédente.

Schéma : deux demi-piles reliées par un pont salin :  
 Zn(s) | Zn<sup>2+</sup>(aq) // Cu<sup>2+</sup>(aq) | Cu(s)

- /1 Deux 1/2 piles
- /1 Pont salin

**Q35.** Écrire les demi-équations se produisant à l'anode et à la cathode en précisant à chaque fois s'il s'agit d'une oxydation ou d'une réduction. Justifier.

Anode (oxydation) : Zn → Zn<sup>2+</sup> + 2e<sup>-</sup>  
 Cathode (réduction) : Cu<sup>2+</sup> + 2e<sup>-</sup> → Cu

- /1 Identification de la transfo spontanée grâce aux E°
- /1 Anode/cathode ok
- /1 demi-équations ok

**Q36.** Indiquer le sens de circulation et la nature des porteurs de charge dans les fils électriques.

Dans les fils électriques, les porteurs de charge sont les électrons. Ils circulent de l'anode (Zn) vers la cathode (Cu) dans le circuit extérieur.

- /1 porteurs de charge = électrons
- /1 sens de déplacement ok

**Q37.** Quelle est la nature des porteurs de charge dans le pont salin ? Préciser le rôle de ce pont.

Les porteurs de charge dans le pont salin sont des ions (anions et cations).  
Son rôle est d'assurer l'électroneutralité des deux solutions et de fermer le circuit électrique.

/1 nature des porteurs de charge  
/1 un des deux rôles du PS

La pile à combustible considérée est alimentée en dihydrogène gazeux  $H_2(g)$  et dioxygène gazeux  $O_2(g)$ . Les couples oxydo-réducteurs sont :  $H^+_{(aq)}/H_2(g)$  et  $O_2(g)/H_2O(l)$ . Le cœur de la pile est composé de deux électrodes, l'anode et la cathode, séparées par un électrolyte.

**Q38.** Préciser les nombres d'oxydation des différents éléments constituant chacune des quatre espèces chimiques :  $H^+$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  et  $H_2O$ .

Par définition :  
n.o.(H dans  $H_2$ ) = n.o.(O dans  $O_2$ ) = 0 (corps simples)  
n.o.(H dans  $H^+$ ) = +I (ion monoatomique)  
Et puisque l'oxygène est plus électronégatif que l'hydrogène :  
n.o.(H dans  $H_2O$ ) = +I et n.o.(O dans  $H_2O$ ) = -II

/1 n.o. = 0 dans un corps simple  
/1 n.o. = +I pour H dans  $H^+$  et  $H_2O$   
/1 n.o. = -II pour O dans  $H_2O$

**Q39.** Le réactif oxydé est appelé le combustible de la pile. Parmi les espèces chimiques présentes dans les couples, laquelle constitue le combustible ?

$H_2(g)$  est le combustible car son nombre d'oxydation augmente, donc il s'oxyde.

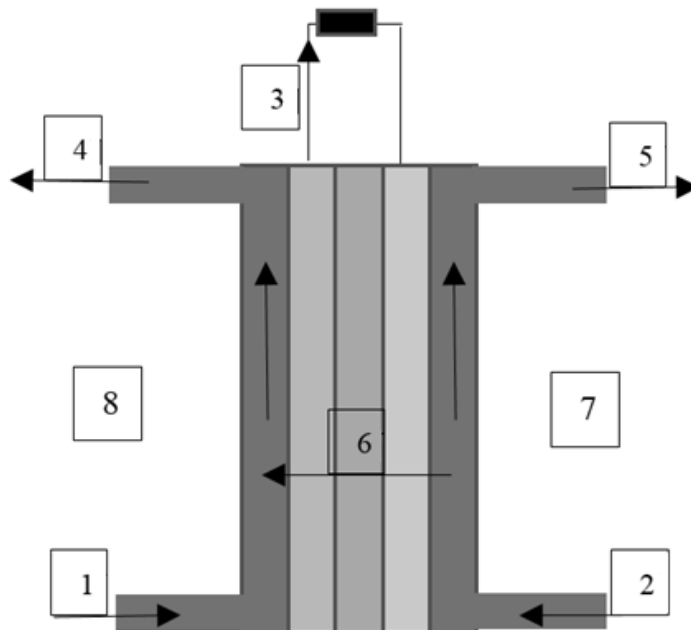
/1 justif avec augmentation du n.o.  
/1 identification de  $H_2$

**Q40.** Écrire les deux demi-équations d'oxydoréduction qui ont lieu dans la pile à combustible, en précisant pour chacune son sens et sa nature (oxydation ou réduction).

Anode (oxydation) :  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$   
Cathode (réduction) :  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

/1 oxydation de  $H_2$   
/1 réduction de  $O_2$

Une variante de la pile à combustible étudiée ci-dessus est une pile à oxydes solides (SOFC en anglais), dans laquelle les ions oxyde  $O^{2-}$  migrent de la cathode alimentée en air vers l'anode alimentée en dihydrogène et où l'eau est produite. Une telle pile à combustible de type SOFC utilise comme oxyde solide la zircone stabilisée à l'yttrium (YSZ en anglais) correspondant à une substitution partielle d'ion zirconium par des ions yttrium dans l'oxyde  $ZrO_2$ .



**Figure 3** – Schéma de la pile à combustible SOFC

**Q41.** Établir la correspondance entre les huit numéros du schéma de la figure 3 et la liste suivante :  $H_2(g)$ , air (dont  $O_2(g)$ ),  $O^{2-}$ , électrons, anode, cathode,  $H_2O(l)+H_2(g)$ , air appauvri.

1 et 2 : réactifs, donc  $\text{H}_2(\text{g})$  et l'air, dont  $\text{O}_2(\text{g})$   
 4 et 5 : produits, donc  $\text{H}_2\text{O}(\ell)$  (+  $\text{H}_2(\text{g})$  en excès...) et l'air appauvri  
 3 = électrons circulant dans le circuit électrique extérieur à la pile

/1 Identification de  $\text{O}^{2-}$  et  $e^-$   
 /1 Identification des réactifs  
 /1 Identification des produits  
 /1 Identification de anode / cathode

Il y a migration de  $\text{O}^{2-}$  au sein de la pile, donc 6 =  $\text{O}^{2-}$   
 Puisque  $\text{O}^{2-}$  migre de la cathode alimentée en air, vers l'anode alimentée en dihydrogène alors 2 = air dont  $\text{O}_2(\text{g})$  et 1 =  $\text{H}_2(\text{g})$

Par déduction : 5 = air appauvri et 4 =  $\text{H}_2\text{O}(\ell)$  (+  $\text{H}_2(\text{g})$  en excès...)

Il y a réduction du dioxygène à la cathode, donc 7=cathode, où a lieu la 1/2 équation :  $4 e^- + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{O}^{2-}$

Il y a oxydation du dihydrogène à l'anode, donc 8=anode, où a lieu la 1/2 équation :  $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2 e^-$

**Q42.** La cathode constitue-t-elle le pôle positif ou négatif? Justifier.

Les électrons sont produits lors de l'oxydation, donc à l'anode et sont captés lors de la réduction, donc à la cathode. Or, dans le circuit électrique, ils circulent du pôle négatif au pôle positif. La cathode est donc le pôle positif.

/1

Dans un véhicule motorisé fonctionnant grâce à une pile à combustible, on estime à 1,5 kg la masse de dihydrogène nécessaire pour parcourir 250 km.

**Q43.** En considérant le dihydrogène comme un gaz parfait, calculer la quantité de matière de dihydrogène correspondant à cette masse, puis le volume occupé par cette quantité de gaz à 20°C sous pression atmosphérique ( $p_{atm} = 1,0 \cdot 10^5$  Pa). Commenter la valeur obtenue.

Par définition de la masse molaire :  $n = \frac{m}{M(\text{H}_2)}$

/1 EL pour  $n$   
 /1 valeur numérique de  $n$   
 /1 EL pour  $V$   
 /1 valeur numérique de  $V$   
 /1 conclusion

**A.N. :**  $n = \frac{1,5 \text{ kg}}{2,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 7,5 \cdot 10^2 \text{ mol}$  D'après la loi des GP :  $V = \frac{n R T}{p_{atm}}$

**A.N. :**  $V = \frac{7,5 \cdot 10^2 \times 8,31 \times (273 + 20)}{1,0 \cdot 10^5} = \frac{1,8 \cdot 10^6}{1,0 \cdot 10^5} = 18 \text{ m}^3$

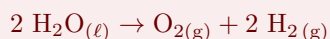
Ce volume est conséquent, et nécessite donc le stockage du dihydrogène sous forte pression, ce qui ajoute le risque d'explosion à celui d'inflammation (sur Terre, pas sur Mars!).

Il est à noter qu'aucune connaissance sur l'électrolyse n'est nécessaire pour répondre aux questions suivantes. On considère désormais l'électrolyse de l'eau  $\text{H}_2\text{O}(\ell)$  qui correspond à la réaction inverse, c'est-à-dire à la formation par voie électrochimique de  $\text{H}_2(\text{g})$ , ainsi que de  $\text{O}_2(\text{g})$ , par l'application d'un courant électrique au travers de deux électrodes séparées par un électrolyte.

**Q44.** Donner l'équation de la réaction d'électrolyse de l'eau.

En repartant des demi-équations de Q40 :

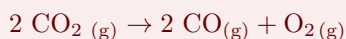
/1



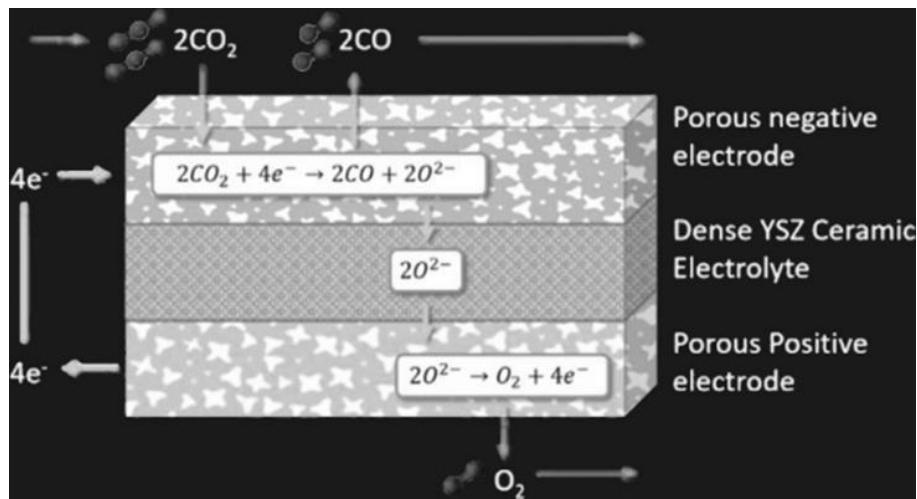
**Q45.** À partir du document 4, écrire l'équation de la réaction de l'électrolyseur utilisant le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère martienne.

D'après le document 4, le réactif (unique) est  $\text{CO}_2$  et les produits sont CO et  $\text{O}_2$ , d'où l'équation de réaction :

/1



**Document 4 – MOXIE**



YSZ désigne l'oxyde de zircon stabilisé à l'yttrium (substitution partielle d'ions zirconium par des ions yttrium dans l'oxyde  $ZrO_2$ )

Source : Meyen, FE, Hecht, MH et Hoffman, JA (2016).  
Modèle thermodynamique de l'expérience ISRU sur l'oxygène de Mars (MOXIE).  
Acta Astronautica

**Q46.** Dans quel but l'électrolyse du dioxyde de carbone peut-elle être mise en œuvre sur Mars ou dans la station spatiale internationale ?

L'électrolyse du dioxyde de carbone permet de régénérer du dioxygène pour la respiration humaine, soit à partir du  $CO_2$  de l'atmosphère martienne, soit à partir du  $CO_2$  produit par la respiration elle-même (dans l'ISS). Attention tout de même à ne pas se tromper de compartiment : le monoxyde de carbone produit à la cathode est mortel...

/1

### II.3 – Ingenuity

#### Document 5 – Ingenuity

En mai 2018, la NASA a annoncé que Perseverance embarquera un petit hélicoptère expérimental MHS (Mars Helicopter Scout) pesant 1,8 kilogramme. Baptisé Ingenuity, il testera l'intérêt du recours à des vols de reconnaissance optique. L'expérimentation doit durer une trentaine de jours. Il se déplace dans les airs grâce à deux rotors bipales tournant en sens contraires. La vitesse de rotation est comprise entre 2400 et 2900 tours par minute, soit 10 fois celle des pales d'un hélicoptère sur Terre. En effet l'atmosphère martienne étant très ténue, l'air y est peu dense et nécessite donc une vitesse de rotation plus importante pour que l'appareil se soulève du sol.



Source : Dossier Presse Mars 2020 [www.cnes.fr](http://www.cnes.fr)

#### Théorie de Rankine-Froude

La théorie de Rankine-Froude date de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Ses concepteurs visaient à modéliser le fonctionnement macroscopique des hélices marines pour prédire leur poussée et la puissance nécessaire à leur rotation.

Elle permet également de mettre en relation la puissance  $P$  d'un hélicoptère et la force de poussée  $F$  fournie :

$$P = \sqrt{\frac{F^3}{2\rho S}}$$
 où  $F$  est la force de poussée fournie,  $\rho$  la masse volumique de l'atmosphère martienne et  $S$  la surface balayée par les pales de l'hélicoptère (celles d'Ingenuity ont un rayon de 60 cm).

**Q47.** On sait que l'atmosphère martienne est environ 100 fois moins dense que l'atmosphère terrestre et que l'accélération de la pesanteur martienne a pour valeur  $g = 3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . À partir des données et du document 5, donner l'ordre de grandeur de la puissance nécessaire pour qu'Ingenuity effectue un vol stationnaire, c'est-à-dire, développe une force de poussée de valeur égale à celle de son propre poids.

$$F = mg = 1,8 \times 3,7 \approx 6,7 \text{ N}$$

$$\rho = \frac{1,29}{100} \approx 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$S = \pi r^2 = \pi \times (0,60)^2 \approx 1,1 \text{ m}^2$$

$$P = \sqrt{\frac{6,7^3}{2 \times 1,3 \cdot 10^{-2} \times 1,1}} = \sqrt{\frac{300}{0,029}} \approx 1 \cdot 10^2 \text{ W}$$

/1 prise en compte de  $F = mg$   
et  $\rho = \rho_T/100$   
/1 Expression de  $S$   
/1 AN correctement posée  
(conversion des cm en m)  
/1 valeur numérique correcte  
(avec U)

**Q48.** À partir du document 5, évaluer la vitesse angulaire maximale de rotation d'une hélice en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$N_{max} = 2900 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$$

$$\omega_{max} = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi \times 2900}{60} \approx 3 \cdot 10^2 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}.$$

/1 Facteur de conversion  
 $2\pi/60$   
/1 AN

**Q49.** En déduire la vitesse correspondante d'un point en bout de pale.

$$v = r\omega = 300 \times 0,60 = 180 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

/1 EL de  $v$   
/1 AN

**Q50.** À partir de la question précédente, quel aurait été le problème rencontré si ces pales avaient eu un rayon de 1 m ?

$v = 300 \times 1 = 300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = c_{son}$  sur Mars. Les pales atteindraient la vitesse du son, ce qui causerait des problèmes d'ondes de choc et rendrait le vol impossible ou très perturbé.

/1 Calcul de  $v$   
/1 comparaison à  $c_{son}$

**Q51.** Le moment d'inertie  $J$  d'une pale par rapport à son axe de rotation est approximativement  $J = \frac{mR^2}{12}$ , où  $m$  est sa masse et  $R$  sa longueur. Déterminer le moment d'inertie correspondant à une hélice de l'hélicoptère, constituée de deux pales (chacune ayant une masse de 100 g).

$$\text{Pour une pale : } J_1 = \frac{0,1 \times (0,60)^2}{12} = \frac{0,1 \times 0,36}{12} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2. \text{ Pour}$$

$$\text{deux pales : } J = 2J_1 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2.$$

/1 prise en compte des deux  
pales  
/1 AN J total (avec U!)

**Q52.** En déduire le moment cinétique lorsque cette hélice tourne à vitesse maximale.

$$L = J\omega = 6 \cdot 10^{-3} \times 300 = 1,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}.$$

/1 Expression littérale de  $L$   
/1 AN

**Q53.** Sur le document 5, on voit deux hélices contrarotatives, c'est-à-dire, pouvant tourner en sens inverse. Quel serait le moment cinétique de la deuxième hélice, tournant en sens contraire ?

Le moment cinétique de la deuxième hélice est  $L_2 = -1,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  (même module, sens opposé).

/1

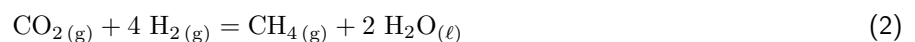
**Q54.** Quelle peut être l'utilité du caractère contrarotatif de ce dispositif ?

La somme des moments cinétiques des deux hélices est nulle. Cela évite que le fuselage tourne dans le sens inverse des pales par conservation du moment cinétique. Sur un hélicoptère classique, le rotor de queue sert à compenser ce couple.

/1

## Partie III – Le retour

En prévision du retour des échantillons prélevés par Perseverance, puis d'éventuels astronautes, il est nécessaire de prévoir la fabrication du carburant nécessaire sur place. Ceci est possible, à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère martienne, dans le cadre de la réaction suivante, appelée réaction de Sabatier :

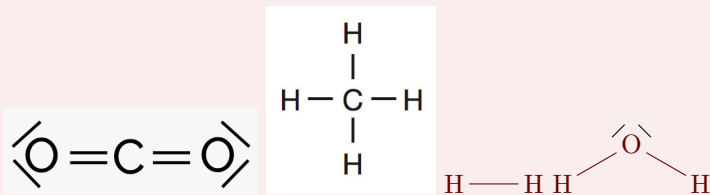


De plus, les générateurs de dioxygène d'une station spatiale produisent le dioxygène  $\text{O}_2$  par électrolyse de l'eau  $\text{H}_2\text{O}$ , ce qui libère du dihydrogène  $\text{H}_2$ . Par la suite, la respiration des astronautes convertit ce dioxygène en dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ . Le dihydrogène  $\text{H}_2$  et le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  peuvent être utilisés pour former de l'eau suivant la réaction de Sabatier.

**Q55.** Proposer un schéma de Lewis pour chacune des quatre espèces chimiques impliquées dans la réaction de Sabatier.

Chaque atome d'hydrogène apporte 1 électron de valence, chaque atome de carbone en apporte 4 et chaque atome d'oxygène en apporte 6, d'où les schémas de Lewis :

/1 pour H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>  
/1 pour CO<sub>2</sub>  
/1 pour H<sub>2</sub>O



**Q56.** Indiquer la polarité de chacune de ces quatre espèces chimiques, en justifiant précisément la réponse.

CO<sub>2</sub> apolaire, liaisons polaires CO mais opposées molécule linéaire. H<sub>2</sub> apolaire, même électronégativité. CH<sub>4</sub> apolaire, mêmes liaisons CH en structure tétraédrique et/ou C et H ont quasiment la même électronégativité. H<sub>2</sub>O polaire, liaisons polarisées HO par différence d'électronégativité + molécule coudée

/1 électronégativité = origine polarisation des liaisons  
/1 prise en compte de la géométrie  
/1 définition d'une molécule polaire  
/1 application de tout ça sur les 4 molécules

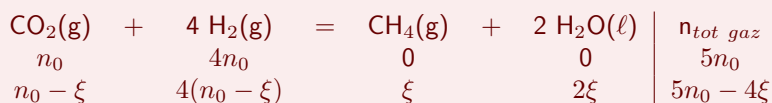
**Q57.** Discuter de la solubilité de chacun des constituants gazeux de la réaction dans l'eau liquide produite par la réaction. Conclure.

L'eau est un solvant polaire (et protique) qui solvate bien les molécules polaires et très mal les molécules apolaires. Aucune des espèces gazeuses (toutes apolaires d'après la question précédente) ne sera donc très soluble dans l'eau. Remarque : même si CO<sub>2</sub> est peu soluble dans l'eau, il est responsable de son acidification que ce soit dans le cadre de l'eau distillée ou dans celui des océans...

/1 eau = solvant polaire...  
/1 ... qui solvate mal les solutés apolaires!

On envisage une transformation modélisée par la réaction de Sabatier, se déroulant à température  $T$  et pression  $P$  constantes, en présence d'un mélange stœchiométrique des réactifs et en l'absence de produits à l'état initial. On notera  $n_0$  la quantité de matière de dioxyde de carbone introduite à l'état initial,  $\xi$  l'avancement du système pour un état donné et  $K^\circ$  la valeur de la constante d'équilibre à la température  $T$ .

**Q58.** Dresser le tableau d'avancement correspondant à la transformation réalisée. On ajoutera une colonne correspondant à la quantité totale de gaz présents.



/1 El correctement rempli  
/1 Elnt correctement rempli  
/1 colonne de  $n_{tot\ gaz}$  correctement remplie

**Q59.** Exprimer le quotient de réaction en fonction des différentes pressions partielles des constituants gazeux pour un état d'avancement différent de l'état initial.

$$Q = \frac{(a_{\text{CH}_4(\text{g})})(a_{\text{H}_2\text{O}(\ell)})^2}{(a_{\text{CO}_2})(a_{\text{H}_2})^4} = \frac{P_{\text{CH}_4}(P^\circ)^4}{P_{\text{CO}_2}(P_{\text{H}_2})^4}$$

/1 expression correcte avec les activités  
/1  $a(\text{H}_2\text{O}(\ell)) = 1$   
/1 expression finale correcte (donc  $a(\text{gaz } k) = \frac{P_k}{P^\circ}$ )

**Q60.** Définir le taux d'avancement de la réaction, noté  $\tau$ .

$$\tau = \frac{\xi}{\xi_{max}} = \frac{\xi}{n_0} \text{ avec } \xi_{max} = n_0 \text{ l'avancement maximal de la réaction, qui correspondrait ici à la consommation complète de tous les réactifs car le mélange initial est stœchiométrique.}$$

/1 def à partir de  $\xi_{max}$   
/1 détermination de  $\xi_{max} = n_0$

**Q61.** Montrer que le quotient de réaction peut se mettre sous la forme  $Q = f(\tau) \times \left(\frac{P^\circ}{P}\right)^4$  où  $P$  est la pression totale du système et  $f$  une fonction croissante.

$$Q = \frac{x_{\text{CH}_4}}{x_{\text{CO}_2}(x_{\text{H}_2})^4} \left( \frac{P^\circ}{P} \right)^4 = \frac{\xi (5n_0 - 4\xi)^4}{(n_0 - \xi)[4(n_0 - \xi)]^4} \left( \frac{P^\circ}{P} \right)^4$$

D'où :  $f(\tau) = \frac{1}{4^4} \frac{\tau (5 - 4\tau)^4}{(1 - \tau)^5}$  expression délicate en l'état pour déterminer son évolution sur  $[0, 1]$  ; il vaut mieux préférer l'expression obtenue à partir de la loi de Dalton :  $f(\tau) = \frac{x_{\text{CH}_4}}{x_{\text{CO}_2}(x_{\text{H}_2})^4}$  avec un numérateur croissant et un dénominateur décroissant lorsque  $\tau$  croît, ce qui prouve que  $f$  est croissante.

- /1 loi de Dalton :  $P_k = x_k P$
- /1 expressions des  $x_k = \frac{n_k}{n_{\text{tot gaz}}}$
- /1 expression de  $f(\tau)$
- /1 sens d'évolution de  $f$

**Q62.** Comment agir sur la pression pour maximiser la quantité d'eau formée à l'équilibre ?

La loi de l'équilibre s'écrit :  $Q_{r,eqb} = K^\circ$ . Si on part d'une situation d'équilibre donnée, et qu'on augmente la pression du réacteur, alors  $Q$  va diminuer, et puisque la température n'est pas modifiée, on aura donc  $Q < K^\circ$ . Ainsi, la réaction va avancer vers la formation des produits, et le taux d'avancement va augmenter. Il faut donc augmenter la pression pour former plus d'eau (la réaction se fait dans le sens direct = celui de la diminution de la quantité de gaz).

- /1 loi de l'équilibre
- /1 évolution de  $Q$  suite à variation de pression
- /1 maintien de la valeur de  $K^\circ$
- /1 conclusion

## Données

Constante des gaz parfaits	$R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Conversion entre échelles de température	$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$
Masse volumique de l'atmosphère terrestre	$\rho_T = 1,29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Potentiels rédox standard	$E^\circ(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}_{(s)}) = -0.76 \text{ V}$
	$E^\circ(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}_{(s)}) = 0.34 \text{ V}$
Masse molaire de l'hydrogène	$M(\text{H}) = 1,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Masse molaire du carbone	$M(\text{C}) = 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Masse molaire de l'oxygène	$M(\text{O}) = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

**FIN**