

EXERCICE I – Capture géologique du dioxyde de carbone (4 points)

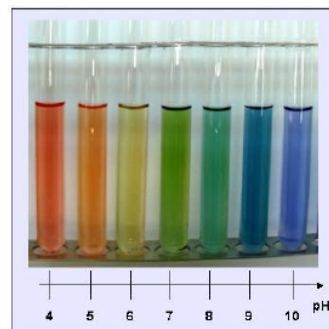
Les scientifiques ont établi le lien entre l'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère et l'augmentation de la température terrestre moyenne. Le procédé CarbFix, développé en Islande, permet de piéger dans des roches souterraines du dioxyde de carbone produit par les activités humaines.

Principe du procédé CarbFix : le dioxyde de carbone $\text{CO}_2(\text{g})$ est dissous sous pression dans de l'eau. La solution obtenue est injectée dans des roches basaltiques entre 400 m et 500 m de profondeur. Le contact entre la solution et les roches entraîne une dissolution partielle des roches basaltiques libérant des ions $\text{Mg}^{2+}(\text{aq})$ et $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$, ainsi que la formation d'ions hydrogénocarbonate $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ et d'ions carbonate $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$. Ces ions réagissent alors entre eux pour former du carbonate de calcium $\text{CaCO}_3(\text{s})$ ou de magnésium $\text{MgCO}_3(\text{s})$. Le dioxyde de carbone est ainsi capturé sous forme de carbonates sous terre.

Le but de l'exercice est d'étudier quelques aspects du procédé Carbfix.

Données :

- couples acide-base des espèces chimiques liées au dioxyde de carbone aqueux :
 couple 1 : $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq}) / \text{HCO}_3^-(\text{aq})$ $\text{pK}_{\text{A}_1} = 6,4$ à 25°C ;
 couple 2 : $\text{HCO}_3^-(\text{aq}) / \text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ $\text{pK}_{\text{A}_2} = 10,3$ à 25°C ;
 - masses molaires moléculaires : $M(\text{CO}_2) = 44 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$;
 - concentration standard : $c^\circ = 1,00 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$;
 - masse volumique de l'eau : $\rho(\text{H}_2\text{O}) = 1\,000 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;
 - couleur de solutions comportant quelques gouttes d'un indicateur coloré universel, mélange d'indicateurs colorés, en fonction du pH de ces solutions.
- D'après <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/les-indicateurs-de-ph-924>

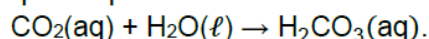


On propose, dans un premier temps, de mettre en évidence l'acidité de la solution de dioxyde de carbone grâce à l'expérience suivante : dans un bécher de 100 mL, on place 50 mL d'eau distillée et quelques gouttes d'indicateur universel. À l'aide d'une paille, un expérimentateur souffle dans l'eau distillée pendant quelques minutes de manière à faire buller l'air expiré dans l'eau distillée. Le résultat de cette expérience est présenté sur la photo ci-dessous.

Avant expiration de l'air**Après expiration de l'air**

1. Expliquer en quoi cette expérience permet de mettre en évidence le caractère acide de la solution aqueuse de dioxyde de carbone.

Le dioxyde de carbone dissous réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$; cette transformation peut être modélisée par l'équation :



2. Indiquer, en justifiant, si l'espèce chimique H_2CO_3 est un acide ou une base de Brönsted.

Dans le procédé CarbFix, de l'eau et du dioxyde de carbone gazeux sont injectés dans la cavité rocheuse, sous pression (25 bar) et à une température comprise entre 20 °C et 30 °C. Le débit en masse d'une grandeur physique représente la masse de cette grandeur injectée dans la cavité par seconde. Dans ce cas, le débit en masse d'eau liquide est de 1 800 g·s⁻¹ et le débit en masse de dioxyde de carbone gazeux est de 70 g·s⁻¹. L'intégralité du dioxyde de carbone gazeux injecté est dissous dans l'eau. On appelle S la solution aqueuse obtenue. On suppose que l'ajout de dioxyde de carbone gazeux à l'eau ne fait pas varier le volume de liquide.

3. Montrer que la solution S présente une concentration en quantité de matière apportée d'acide carbonique H₂CO₃(aq) de valeur $C_S = 0,88 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

On cherche à déterminer la valeur du pH de la solution S₀. On modélise l'évolution du système par la réaction entre l'acide carbonique et l'eau, l'acide carbonique étant un acide faible. On établit le tableau d'avancement suivant, dont les grandeurs sont exprimées en mol·L⁻¹. L'avancement final de la réaction (équilibre chimique) est noté $x_{\text{éq}}$ (en mol·L⁻¹).

Réaction chimique	H ₂ CO ₃ (aq)	+ H ₂ O(l)	→ HCO ₃ ⁻ (aq)	+ H ₃ O ⁺ (aq)
État initial	C _S	Solvant	0	négligeable
État final : équilibre chimique				$x_{\text{éq}}$

4. Reproduire le tableau d'avancement et compléter la ligne correspondant à l'état final avec des expressions littérales.
5. En déduire, à l'équilibre, la relation entre la constante d'acidité K_{A1} du couple H₂CO₃(aq)/ HCO₃⁻(aq), $x_{\text{éq}}$, C_S et c°. On exprimera la relation sous la forme d'une équation de degré 2 : $ax_{\text{éq}}^2 + bx_{\text{éq}} + c = 0$ où a, b et c sont des constantes à exprimer notamment en fonction de K_{A1} , C_S et c°.

La résolution numérique de cette équation de degré 2 conduit à deux solutions :

$$x_{\text{éq}1} = 0,000591 \text{ et } x_{\text{éq}2} = -0,000592.$$

6. En déduire la composition de la solution S à l'équilibre, puis calculer la valeur du pH de la solution S₀ à l'équilibre chimique. Commenter.

Une expérimentation du procédé CarbFix a été réalisée en situation réelle. Des mesures du pH des eaux souterraines (initialement à pH = 9) ainsi que la concentration en carbone inorganique dissous (DIC) ont été réalisées pendant 550 jours. Le DIC prend en compte l'ensemble des espèces carbonées inorganiques (H₂CO₃(aq), HCO₃⁻(aq) et CO₃²⁻(aq)). Les résultats sont donnés à la **figure 2**. Les zones grisées représentent les phases d'injection de dioxyde de carbone : 175 tonnes de dioxyde de carbone ont été injectées lors de la phase 1 (entre janvier et mars 2012) puis 55 tonnes ont été injectées lors de la phase 2 (entre juin et août 2012).

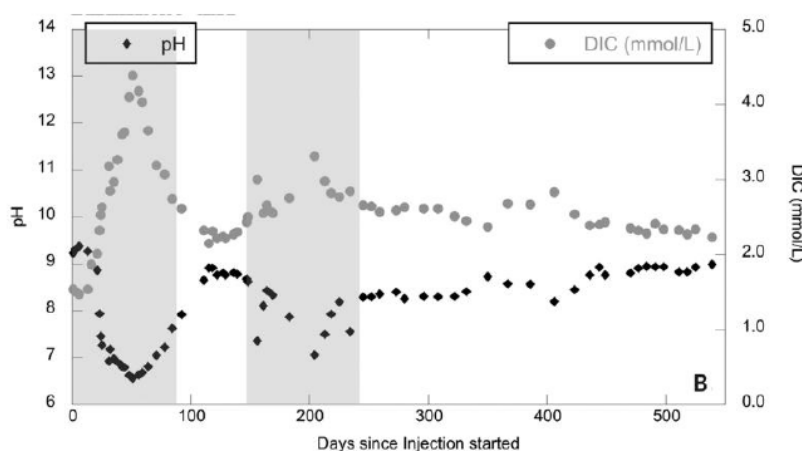


Figure 2. Graphique représentant le pH (noir) et la concentration en carbone inorganique dissous (gris) dans les eaux souterraines en fonction du temps.

Source : Matter, J. M. et al., Science 352, 1312–1314 (2016)

7. Expliquer l'évolution des courbes sur les 300 premiers jours de l'expérience.

EXERCICE II - Pile « zinc-air » (5 points)

Les piles dites « zinc-air » sont utilisées pour alimenter de petits appareils électroniques tels que les appareils auditifs.

Le but de cet exercice est de décrire le fonctionnement d'une pile « zinc-air », puis d'étudier deux applications de ce dispositif.



Une pile « zinc-air » fonctionne en consommant du zinc à l'état solide et du dioxygène contenu dans l'air. Elle est constituée de deux demi-piles et d'un électrolyte basique composé d'une solution gélifiée d'hydroxyde de potassium ($K^+(aq)$, $HO^-(aq)$) assurant le contact électrique entre les deux demi-piles. Un schéma de la pile débitant dans une résistance, notée R , et les réactions électrochimiques aux électrodes sont représentés sur la figure 1.

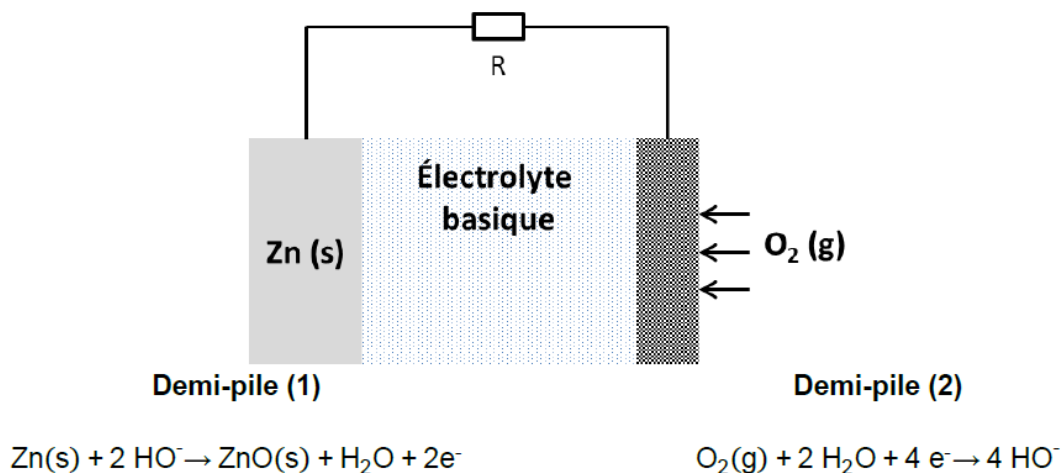


Figure 1. Schématisation du fonctionnement d'une pile « zinc-air ».

1. Écrire l'équation de la réaction d'oxydoréduction modélisant la transformation chimique qui se produit lorsque la pile fonctionne.
2. Identifier l'oxydant et le réducteur dans la réaction d'oxydoréduction modélisant le fonctionnement de la pile. Justifier.
3. Indiquer, en justifiant, les signes des pôles de la pile, les porteurs de charges et leur sens de déplacement dans les fils électriques et au sein de la pile lorsque la pile fonctionne.

Les piles « zinc-air » de type p675 sont utilisées pour alimenter des appareils auditifs. On cherche à déterminer leur autonomie. Pour cela on réalise une expérience de décharge d'une pile « zinc-air » du commerce dans un circuit comportant une résistance $R = 15 \Omega$. On enregistre la valeur de la tension U aux bornes de cette résistance en fonction du temps (figure 2).

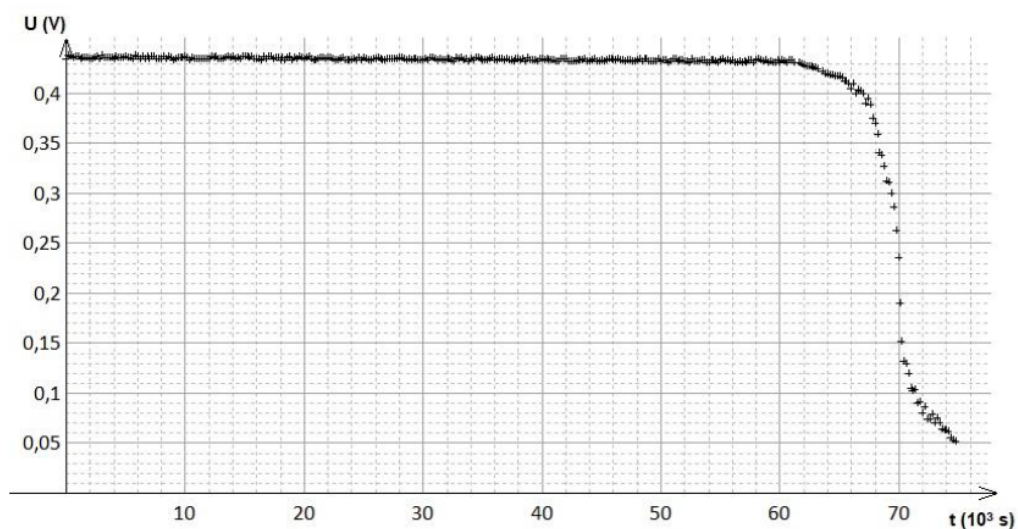


Figure 2. Évolution temporelle de la tension aux bornes de la pile ou de la résistance $R = 15 \Omega$.

4. Identifier, parmi les 3 propositions ci-dessous, celle qui donne une définition correcte de la capacité électrique d'une pile, puis vérifier la validité de la valeur indiquée grâce à une estimation effectuée à partir des résultats expérimentaux.

Proposition 1	La capacité électrique d'une pile correspond à la charge électrique totale qu'elle peut fournir lors de sa décharge. Dans le cas de la pile « zinc-air » étudiée expérimentalement on peut estimer sa valeur à $Q = 2,0 \times 10^3 \text{ C}$.
Proposition 2	La capacité électrique d'une pile correspond à la tension qu'elle peut fournir pendant la décharge. Dans le cas de la pile « zinc-air » étudiée expérimentalement on peut estimer sa valeur à $U = 0,43 \text{ V}$.
Proposition 3	La capacité électrique d'une pile correspond à l'énergie électrique qu'elle peut fournir au cours de sa décharge. Dans le cas de la pile « zinc-air » étudiée expérimentalement on peut estimer sa valeur à $W_{el} = 8,6 \times 10^2 \text{ J}$.

5. En déduire une estimation de l'autonomie (durée de fonctionnement) d'une prothèse auditive alimentée par une telle pile, sachant que le courant circulant dans l'appareil a une intensité de 8 mA. Commenter.

La pile « zinc-air » peut aussi être utilisée comme capteur de dioxygène. On propose dans la suite d'étudier ce capteur et de déterminer grâce à lui le pourcentage de dioxygène dans l'air expiré par un être humain.

Dans une étude publiée en 2009 dans *Chemical Education Journal*, Yuu TANAKA et Nobuyoshi KOGA ont déterminé expérimentalement l'évolution de la valeur de l'intensité I du courant traversant une résistance de 10Ω alimentée par une pile « zinc - air », en fonction du pourcentage de dioxygène dans l'air noté x_{O_2} . Leurs résultats expérimentaux sont présentés sur la figure 3.

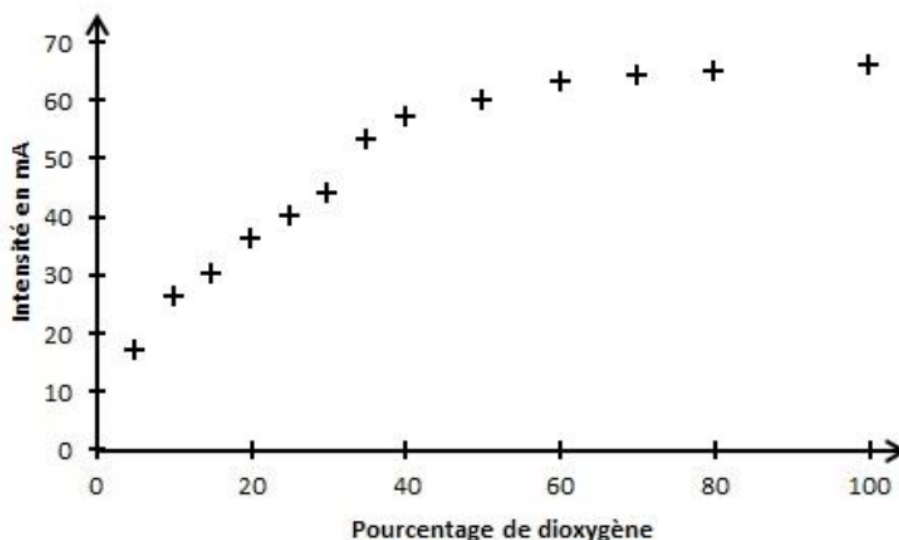


Figure 3. Évolution de l'intensité du courant circulant dans une résistance de 10Ω alimentée par une pile « zinc-air » en fonction de la composition en dioxygène du gaz alimentant la pile.

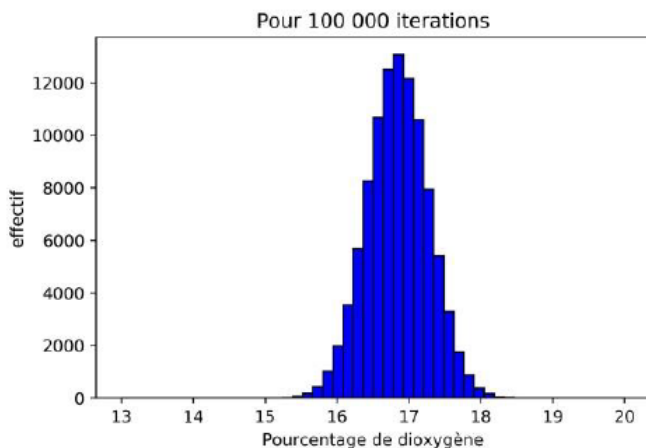
6. En analysant le nuage de points expérimentaux, préciser le domaine dans lequel cette pile peut être utilisée comme capteur de dioxygène et justifier son utilisation possible pour la mesure du pourcentage de dioxygène expiré par un être humain.

Dans un domaine d'utilisation, la réponse de ce capteur peut être modélisée mathématiquement par une relation affine $I = a \times x_{O_2} + b$ avec :

- $a = 1,09 \text{ mA}$ et l'incertitude-type associée $u(a) = 0,03 \text{ mA}$;
- $b = 13,2 \text{ mA}$ et l'incertitude-type associée $u(b) = 0,9 \text{ mA}$.

Une mesure réalisée avec ce capteur sur de l'air expiré conduit à une intensité de courant de valeur $I_{exp} = 31,7 \text{ mA}$ et d'incertitude-type associée : $u(I_{exp}) = 0,2 \text{ mA}$.

À partir des résultats précédents, on détermine le pourcentage de dioxygène dans l'air expiré et l'incertitude-type associée à l'aide d'une simulation prenant en compte les incertitudes sur les coefficients a et b de la loi affine modèle et l'incertitude sur la valeur I_{exp} mesurée. Un traitement statistique des résultats (figure 4) donne la valeur moyenne de x_{O_2} et l'incertitude-type associée.



- I_{exp} mesurée pour le gaz étudié : 31,7 mA
- Pourcentage de dioxygène : 16,8403926039
- Incertitude-type associée au pourcentage de dioxygène : 0,423577403996

Figure 4. Simulation afin de calculer l'incertitude-type associée à la mesure du pourcentage de dioxygène dans l'air expiré.

7. Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat de la mesure du pourcentage de dioxygène dans l'air expiré, réalisée avec le capteur de Tanaka et Koga. Commenter.
8. L'air expiré a également été analysé avec un autre capteur commercial et le pourcentage de dioxygène mesuré est de 16,2 %. Cette valeur sert de valeur de référence pour l'étude du capteur expérimental de Tanaka et Koga.
9. Comparer le résultat de la mesure réalisée grâce au capteur de Tanaka et Koga, avec la valeur de référence afin de conclure à la compatibilité ou à la non-compatibilité entre ces deux valeurs.

EXERCICE III - Un vol inaugural un peu particulier (11 points)

Le 6 février 2018, la compagnie *SpaceX* a procédé au premier vol d'essai de son lanceur spatial lourd *Falcon Heavy*. Ce vol inaugural a mis en orbite autour du Soleil la réplique d'une voiture électrique. L'orbite de cette réplique autour du Soleil est elliptique et elle croise l'orbite de la planète Mars.

Dans cet exercice, on s'intéresse d'abord à une des innovations majeures de ce vol : le retour des propulseurs sur Terre pour une réutilisation ultérieure. On étudie ensuite l'orbite de Mars. Enfin, quelques propriétés thermiques en lien avec les carburants utilisés sont abordées. Les trois parties sont indépendantes.



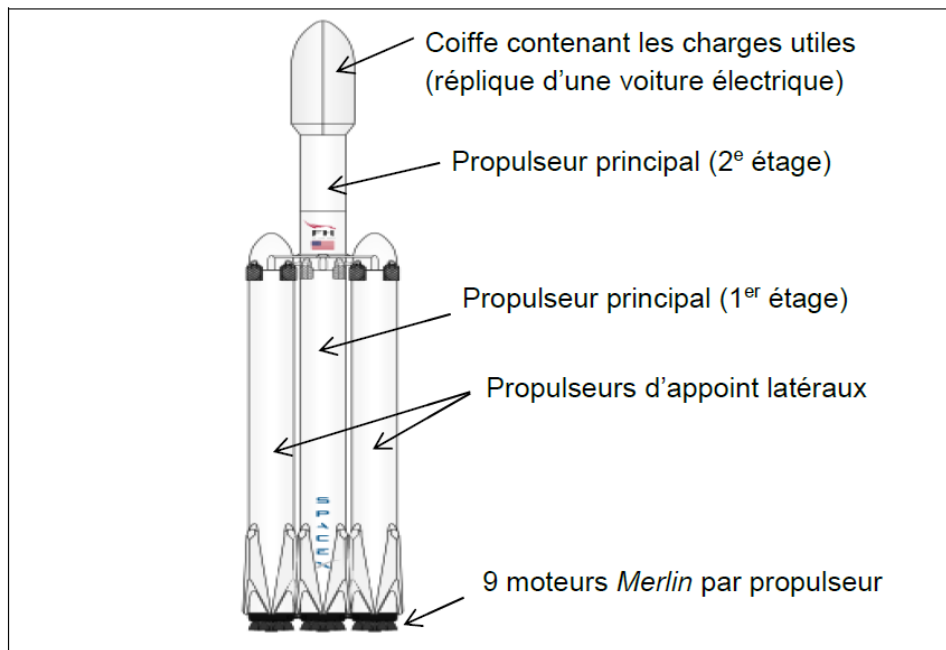
A - Le retour des propulseurs latéraux sur Terre

Lors du vol d'essai du *Falcon Heavy* la compagnie *SpaceX* a réussi à récupérer intacts les deux propulseurs latéraux à proximité de la zone de décollage, grâce à une manœuvre spécifique.

Données :

➤ Schéma descriptif du lanceur spatial *Falcon Heavy*

Le lanceur spatial possède 27 moteurs de type *Merlin*, 9 moteurs sur chacun des 3 propulseurs allumés au décollage : le propulseur principal et les deux propulseurs latéraux.



➤ **Caractéristiques d'un propulseur latéral**

Dimension (longueur × diamètre)	44,6 m × 3,66 m
Masse à vide	22,5 tonnes
Masse au décollage (avec ergols)	433,5 tonnes
Masse à l'atterrissage	25,3 tonnes

- Poussée maximale d'un moteur *Merlin* au niveau du sol : 845 kN
La poussée de chaque moteur *Merlin* est modulable entre 50 % et 100 % de la poussée maximale. Elle représente la force subie par la fusée du fait de l'éjection des gaz.
- Valeur du champ de pesanteur au niveau du site d'atterrissage : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

La figure 1 ci-dessous reproduit de façon simplifiée le déroulement de la phase de lancement. Après séparation du propulseur principal, les propulseurs latéraux effectuent une manœuvre de retournement qui leur permet de se mettre dans le même sens qu'au décollage. La descente alterne des phases où des réacteurs sont allumés et des phases où ils sont tous éteints.

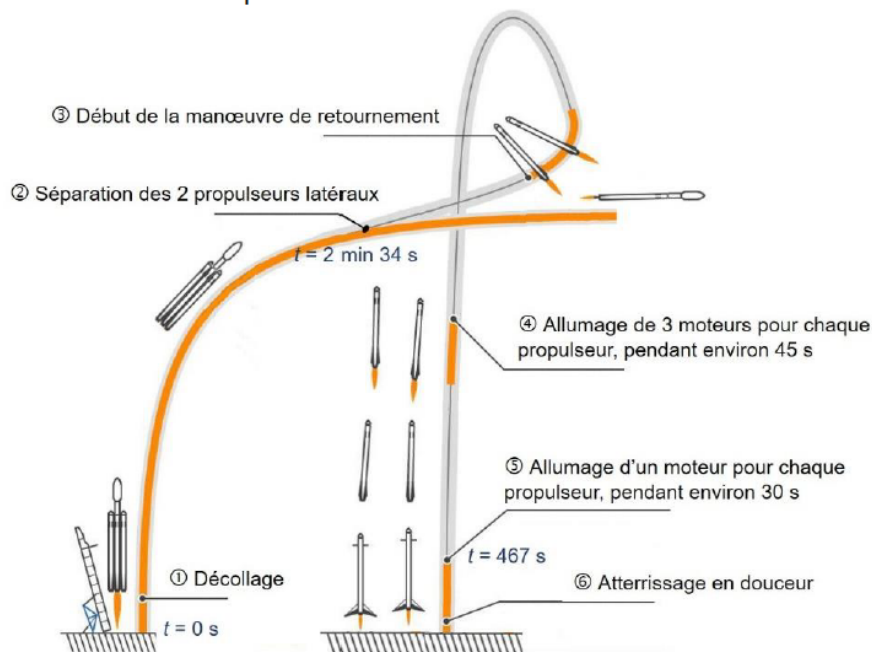


Figure 1. Représentation simplifiée de la récupération des propulseurs latéraux.

On s'intéresse à la phase finale de descente d'un des deux propulseurs, dont on note G_P le centre de masse. Au cours de cette phase, on considère que le mouvement est vertical. L'origine des temps est prise au décollage. Les évolutions temporelles de la norme de la vitesse (notée v) et de l'altitude du point G_P repérée à l'aide d'un axe (Oz) vertical orienté vers le haut et dont l'origine est choisie au sol, sont représentées figure 2 toutes les secondes, à partir de la date $t = 420$ s jusqu'à l'atterrissage.

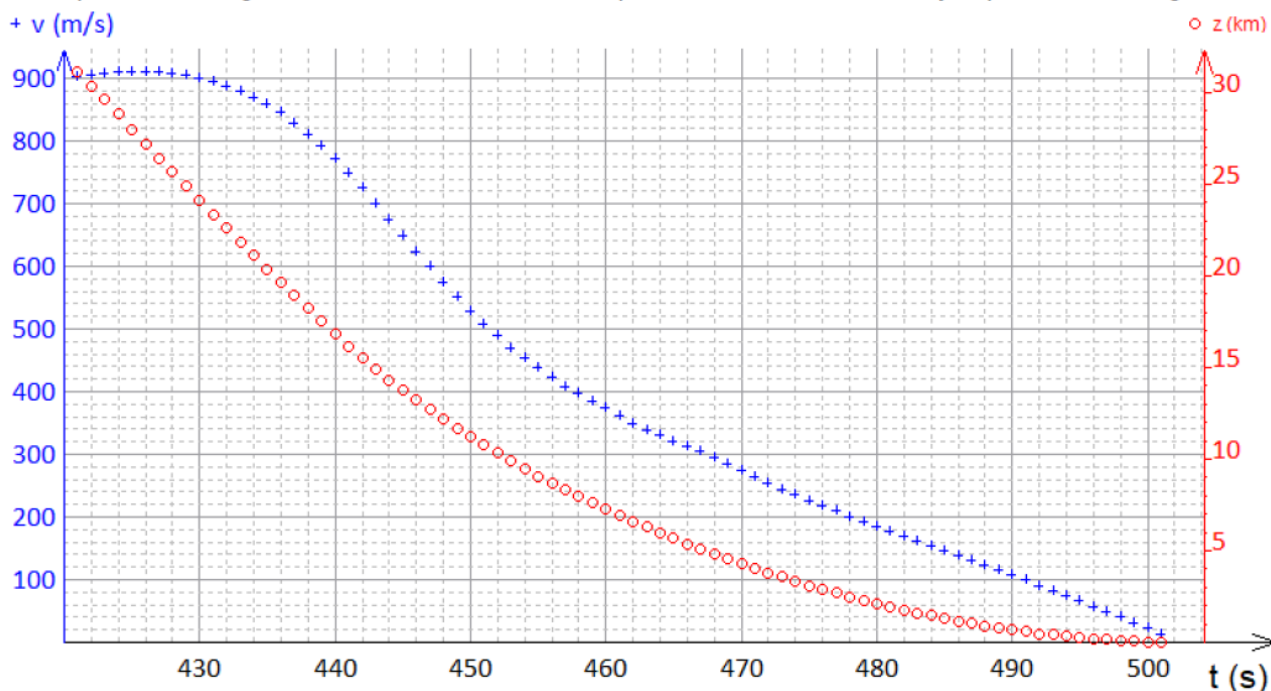


Figure 2. Évolution de la vitesse et de l'altitude d'un propulseur pendant les 80 secondes précédant l'atterrissage (le quadrillage correspond à l'axe de la vitesse).

1. En utilisant le principe d'inertie, interpréter le fait que la vitesse puisse être approximativement constante pendant une certaine durée au cours de la descente alors que les moteurs sont éteints (approximativement entre 420 s et 430 s).
2. Lien entre vitesse et altitude.
 - 2.1. Faire un schéma (sans souci d'échelle) de la situation lors de la descente sur lequel figurent l'axe (Oz), un vecteur unitaire \vec{k} , le point G_P et le vecteur vitesse du centre de masse.
 - 2.2. Rappeler la définition du vecteur vitesse du centre de masse G_P .
 - 2.3. Établir la relation entre la norme de la vitesse v et la dérivée de l'altitude z par rapport au temps, et indiquer qualitativement pourquoi cette relation est en accord avec les courbes de la figure 2.
3. Déterminer graphiquement, en explicitant la démarche, la valeur de la norme du vecteur accélération du centre de masse du propulseur dans la dernière phase de l'atterrissage ($t > 467$ s).
4. Pour modéliser l'atterrissage dans les quatre dernières secondes, on choisit de considérer que l'action de l'air est négligeable (la vitesse étant alors suffisamment faible) et que la masse du propulseur est constante (masse à l'atterrissage notée M). On note \vec{F} la force dite de *poussée* exercée sur le propulseur grâce à un unique moteur *Merlin* en marche.
 - 4.1. Représenter sur un schéma, sans soucis d'échelle, les forces exercées sur le propulseur. Le schéma doit être en accord avec les réponses aux questions précédentes.
 - 4.2. Exprimer puis évaluer la valeur de la norme de la force de poussée. Commenter le résultat obtenu.

Pour les questions (4.1. et 4.2.), le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

B - Le mouvement de la planète Mars

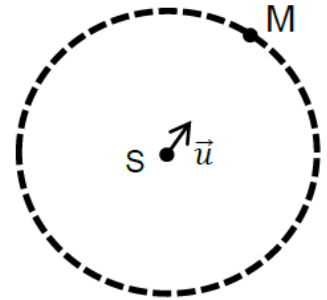
Le projet prévoyait de mettre initialement la réplique de la voiture électrique en orbite autour de Mars. Elle a finalement été mise en orbite elliptique autour du Soleil, sur une orbite qui croise celle de la planète Mars.

On s'intéresse dans cette partie au mouvement de la planète Mars. On considère que la planète Mars possède une orbite circulaire autour du Soleil.

Données :

- constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;
- masse du Soleil : $M_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$;
- masse de la planète Mars : $M_M = 6,42 \times 10^{23} \text{ kg}$;
- rayon de l'orbite de Mars, considérée circulaire : $d_{MS} = 2,28 \times 10^8 \text{ km}$;
- trajectoire circulaire du centre de Mars (M) autour du Soleil (centre noté S).

\vec{u} est le vecteur unitaire orienté de S vers M.



L'étude est conduite dans le référentiel héliocentrique, c'est-à-dire centré sur le Soleil et dont les axes pointent vers des étoiles fixes, considéré comme galiléen.

1. Reproduire sur la copie le schéma représentant la trajectoire circulaire du centre de masse de Mars autour du Soleil et représenter la force exercée par le Soleil sur Mars.
2. Établir l'expression du vecteur accélération du centre de Mars en fonction de G , M_S , d_{MS} et \vec{u} .
3. Vitesse de Mars sur son orbite.
 - 3.1. À l'aide de l'expression du vecteur accélération dans le repère de Frenet, en déduire que le mouvement de Mars, considéré circulaire, est également uniforme dans le référentiel héliocentrique.
 - 3.2. En déduire l'expression puis la valeur de la vitesse de Mars dans ce référentiel.
4. Exprimer la période, notée T_M , de révolution de Mars autour du Soleil. Vérifier par un calcul qu'elle est voisine de 690 jours.

C - Davantage de carburant dans un même volume

La course aux lanceurs spatiaux impose de trouver un compromis entre masse du lanceur, carburant embarqué, rigidité, sécurité... Augmenter les quantités de carburant et de combustible dans des volumes inchangés, sans augmenter les risques, constitue ainsi un réel enjeu.

Tous les moteurs du *Falcon Heavy* brûlent un mélange de dioxygène liquide (appelé LOX pour *Liquid Oxygen*) et de *Rocket Propellant* (RP-1), une forme de kérosène spécialement raffiné pour être stocké dans les lanceurs spatiaux. Une technique déjà ancienne consiste à baisser la température des carburants et des combustibles en les faisant circuler dans un bain de diazote liquide, afin d'en stocker davantage dans un même volume, pour une pression donnée (de l'ordre de 5 bar). SpaceX a exploité cette technique en refroidissant le LOX d'environ 10°C par rapport à la fusée précédente *Falcon 9* en amenant sa température à 66 K (-207°C). Du fait des gains de densité différents selon l'espèce chimique, il a fallu revoir la taille respective des réservoirs de dioxygène et de kérosène dans la version des *Falcon 9* : le réservoir de dioxygène a été raccourci et celui de kérosène allongé.

Données :

- température d'ébullition du LOX : $-183\text{ °C} = 90\text{ K}$;
- température d'ébullition du diazote : $-196\text{ °C} = 77\text{ K}$;
- densité du LOX stocké : $d_{\text{LOX}} = 1,23$;
- capacité thermique massique du LOX à 66 K : $c = 1659\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- masse volumique du LOX variant de $4,9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ par kelvin, à pression constante ;
- masse de LOX stocké dans le réservoir d'un propulseur latéral au moment du décollage :
 $M = 287,4\text{ t}$.

Pour que l'augmentation de température du LOX dans le réservoir ne soit pas trop importante, le remplissage se fait pendant les 45 minutes précédant le décollage.

1. Le refroidissement du LOX.

- 1.1. Indiquer le sens du transfert d'énergie qui s'effectue entre le LOX et le diazote liquide, ainsi que la conséquence éventuellement observable pour le diazote.
- 1.2. Exprimer, puis calculer, l'énergie échangée entre le LOX et le diazote lors du refroidissement de 10 °C du LOX (par rapport à d'autres vols classiques).

Lorsque le réservoir de LOX est rempli, il est au contact de la paroi du réservoir elle-même en contact avec l'air ambiant. Le réservoir est de type « monocoque » et constitué d'un alliage d'aluminium et de lithium.

On s'intéresse ici à la durée approximative à l'issue de laquelle la température du LOX risque de réaugmenter de 10 °C , ce qui ferait perdre tout le bénéfice du refroidissement.

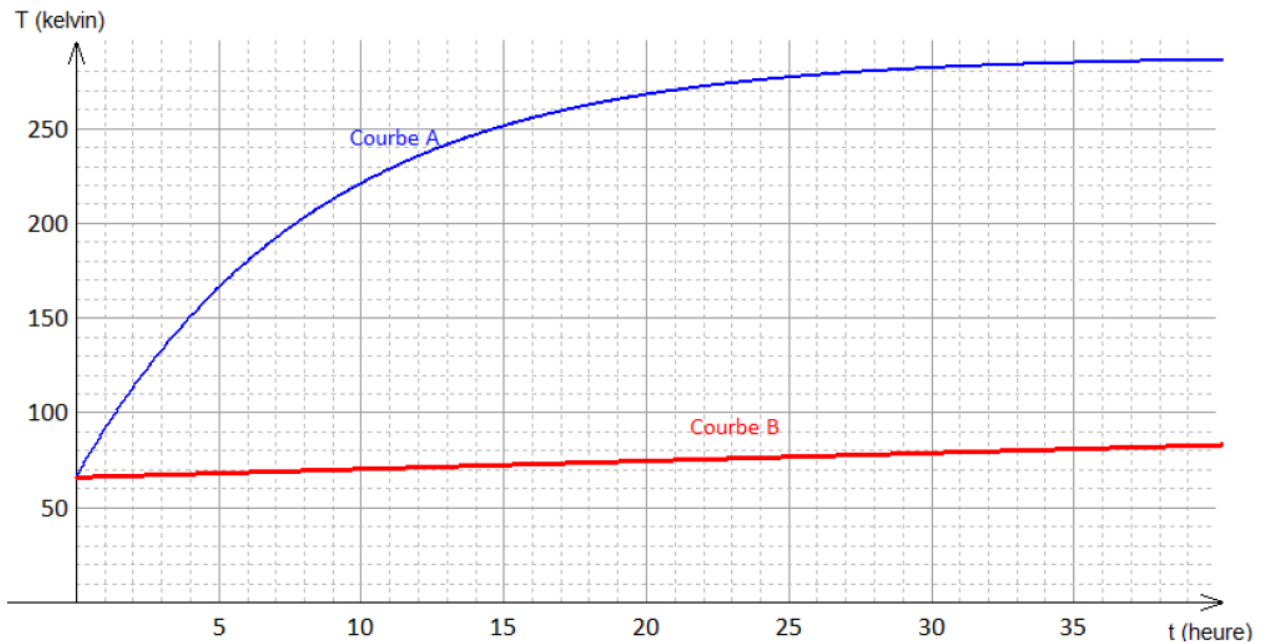
Pour ceci, on adopte les choix de modélisation suivants :

- la convection étant très importante dans l'air extérieur, on modélise l'air extérieur comme un système à température constante T_{air} ;
 - on considère que le flux thermique de l'air vers le LOX à température T peut s'exprimer par la relation $P = hS(T_{\text{air}} - T)$ où S est la surface de contact entre l'air et le réservoir et h est une constante caractéristique de l'échange thermique ;
 - on considère qu'à l'instant initial (considéré comme l'instant où le réservoir est rempli), $T(t = 0) = T_i = 66\text{ K}$.
2. À l'aide d'un bilan d'énergie, établir que l'équation différentielle vérifiée par la température du LOX s'écrit $Mc \frac{dT}{dt} = hS(T_{\text{air}} - T)$.
 3. En déduire que l'expression de la température du LOX au cours du temps s'écrit $T(t) = T_{\text{air}} + A \cdot \exp(-\frac{t}{\tau})$. Exprimer A et τ en fonction de M , c , h , S , T_{air} et T_i et préciser la signification physique de la constante τ .

4. Les deux courbes ci-dessous sont obtenues par simulation en utilisant l'expression de T en fonction du temps obtenue à la question précédente et en choisissant deux valeurs particulières de la constante d'échange h :

$$h_1 = 1,0 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \text{ et } h_2 = 60 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}.$$

La température est indiquée en kelvin, le temps en heure.



- 4.1. En justifiant la réponse, attribuer une valeur de h à chacune de ces courbes.
- 4.2. Indiquer la courbe simulée qui semble la mieux rendre compte de la situation réelle étudiée et estimer, dans ce cas, la durée approximative nécessaire pour une augmentation de 10 K de la température du LOX.
5. À l'aide de l'équation différentielle établie à la question 2, justifier que quelle que soit la valeur de la constante d'échange h , la dérivée de la température par rapport au temps $\frac{dT}{dt}$ peut être considérée constante au début du réchauffement (par exemple pour les dix premiers degrés).
6. Discuter le résultat obtenu à la question 4.2. en menant une analyse des choix de modélisation réalisés.