

Essais en Vol Istres
EPNER

Titre/Grade:

Nom:

Prénom:

Examen:

EXAMEN PROBATOIRE D'ADMISSION

AU STAGE ESSAIS

PARACHUTISTE D'ESSAIS ET DE RECEPTION

SESSION DU 15 NOVEMBRE 2021

ÉPREUVE ÉCRITE DE CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

Durée: 1h – Seule une calculatrice non programmable et non graphique est autorisée --
– Aucun document n'est autorisé pour cette épreuve – Ne rien écrire sur ce document

Document validé par :

Nom :

Date : 05/11/2021

Signature :

Lieutenant-colonel Stéphane Alma
Directeur de l'EPNER



EXERCICE 1: Mission sur la Lune

L'année 2019 a marqué le 50e anniversaire de la mission Apollo 11. En effet, le 20 juillet 1969, l'Homme marche pour la première fois sur la Lune. Le but de cet exercice est d'étudier différents aspects des missions Apollo 11 et 16 : le décollage depuis la Terre, la mise en orbite autour de la Lune et une expérience de détermination de la valeur de l'intensité de la pesanteur lunaire.



Équipage de la mission Apollo 11 en 1969
(de gauche à droite : N. Armstrong, M. Collins,
B. Aldrin)
Source : NASA



Équipage de la mission Apollo 16 en 1972
(de gauche à droite : T. Mattingly, J. Young,
C. Duke Jr.)
Source : NASA

Données :

- constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;
- masse de la Terre : $M_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$;
- masse de la Lune : $M_L = 7,34 \times 10^{22} \text{ kg}$;
- masse du vaisseau Apollo 11 avec son module lunaire : $m_1 = 4,50 \times 10^4 \text{ kg}$;
- rayon de la Terre : $R_T = 6,37 \times 10^3 \text{ km}$;
- rayon de la Lune : $R_L = 1,73 \times 10^3 \text{ km}$;
- intensité de pesanteur terrestre : $g_T = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Pour rappel : $10^3 = 1000$

1. Décollage depuis la Terre de la mission Apollo 11

La fusée Saturn V est composée de trois étages contenant du carburant. Lorsqu'ils sont vides, ces étages se décrochent au fur et à mesure de la progression de la fusée. Le 16 juillet 1969, la fusée Saturn V décolle de cap Canaveral en Floride en emportant l'équipage et le vaisseau Apollo 11 sur lequel est fixé un module lunaire. Elle met en orbite le vaisseau Apollo 11 qui effectue alors 1,5 tour autour de la Terre, afin de permettre la vérification de tous les paramètres du vol. Le vaisseau Apollo 11 est ensuite transféré sur une nouvelle trajectoire grâce au dernier étage de la fusée, qui va le mener à proximité de la Lune.

Pour toute cette partie, l'étude est effectuée dans le référentiel géocentrique dont l'origine est le centre de la Terre et dont les axes pointent vers des étoiles fixes ; le référentiel est supposé galiléen. La valeur de la vitesse du vaisseau Apollo 11 sur son

orbite supposée circulaire de rayon $6,56 \times 10^3 \text{ km}$ (soit une altitude par rapport à la Terre de 190 km) vaut $v_h = 7,79 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le périmètre d'un cercle de rayon R est donné par $2\pi R$.

- 1.1. Calculer la valeur de la durée passée en orbite terrestre par l'équipage dans le vaisseau Apollo 11.
- 1.2. La valeur de l'énergie potentielle de pesanteur du vaisseau Apollo 11 en orbite terrestre est $E_p = 8,39 \times 10^{10} \text{ J}$, l'origine de l'énergie potentielle de pesanteur étant prise nulle au centre de la Terre.
 - 1.2.1. Calculer la valeur de l'énergie cinétique E_c du vaisseau en orbite terrestre.
 - 1.2.2. En déduire la valeur de l'énergie mécanique E_m du vaisseau en orbite terrestre.
- 1.3. La valeur de l'énergie mécanique E_{m0} du vaisseau Apollo 11 avant le décollage est : $E_{m0} = 0 \text{ J}$.
 - 1.3.1. Déterminer l'énergie minimale que doit fournir Saturn V pour mettre en orbite terrestre le vaisseau Apollo 11. Conclure, sachant que la fusée Saturn V est un lanceur qui a la capacité de fournir une énergie de l'ordre de $5 \times 10^{12} \text{ J}$ pour mettre un corps en orbite autour de la Terre.
 - 1.3.2. Expliquer pourquoi l'énergie cinétique du vaisseau avant le décollage n'est pas nulle dans le référentiel géocentrique.

2. Michael Collins en orbite autour de la Lune lors de la mission Apollo 11

Le vaisseau Apollo 11 se trouve au voisinage de la Lune à une altitude $h_L = 110 \text{ km}$ par rapport au sol lunaire. À cet instant, le module lunaire se détache du vaisseau emportant à son bord les deux astronautes Buzz Aldrin et Neil Armstrong vers le sol lunaire. Le troisième astronaute Michael Collins reste seul en orbite dans le vaisseau qui est animé d'un mouvement supposé circulaire uniforme dans le référentiel d'étude centré sur la Lune et supposé galiléen. Libéré de son module, le vaisseau possède alors une masse m_2 qui n'est plus que de $3,0 \times 10^4 \text{ kg}$ environ. Les deux astronautes restent 21 h et 36 min sur le sol lunaire.

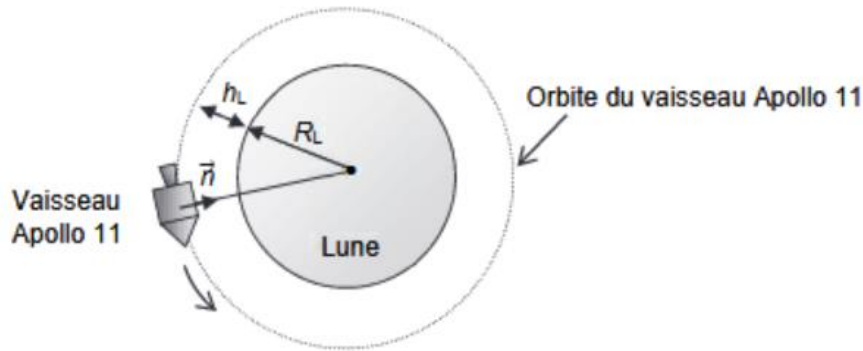


Figure 1. Vaisseau en orbite lunaire à une altitude h_L

On note $\vec{n}$ un vecteur unitaire choisi dans la direction vaisseau – centre de la Lune et dans le sens du vaisseau Apollo 11 vers la Lune (cf. figure 1). On considère que le vaisseau n'est soumis qu'à l'attraction de la Lune.

On rappelle que la force d'attraction d'un objet de masse m sur un objet de masse m' , dont les centres de gravité sont séparés d'une distance r s'écrit :

$$\vec{F} = G \frac{mm'}{r^2} \vec{u}$$

Avec $\vec{u}$ un vecteur partant du centre de gravité de l'objet de masse m' pointant vers le centre de gravité de l'objet de masse m .

- 2.1. En appliquant la deuxième loi de Newton, déterminer l'expression du vecteur accélération $\vec{a}$ du vaisseau Apollo 11 à l'altitude h_L dans le référentiel d'étude.
- 2.2. Donner la relation entre v , $R_L + h_L$ et ω la vitesse de rotation du vaisseau autour de la Lune en rad.s^{-1} .

L'accélération du vaisseau suivant l'axe $\vec{n}$ s'écrit aussi :

$$a = v\omega$$

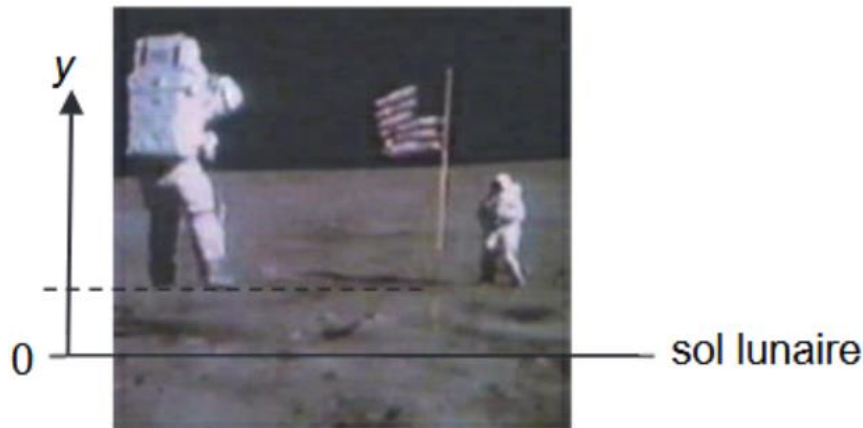
- 2.3. Montrer que la norme de la vitesse v du vaisseau Apollo 11 à l'altitude h_L a pour expression :

$$v = \sqrt{\frac{GM_L}{R_L + h_L}}$$

Et donnez sa valeur.

- 2.4. Calculer la valeur de la période de révolution T du vaisseau Apollo 11, puis déterminer celle du nombre de tours autour de la Lune qu'a fait l'astronaute Michael Collins pendant le séjour des deux autres astronautes sur la Lune.

3. Saut de John Young lors de la mission Apollo 16



Source : NASA

Lors de la mission Apollo 16 en 1972, l'astronaute John Young fait un grand saut vertical. Cette scène a été filmée et la vidéo est exploitée grâce à un logiciel de pointage.

Une image de cette vidéo présentée ci-dessus montre John Young au point le plus haut du saut, ses pieds étant alors situés à 60 cm au-dessus du sol.

On choisit l'axe Oy vertical, orienté vers le haut, l'origine O de cet axe étant situé au niveau du sol lunaire. On repère la position de John Young selon cet axe en pointant la position de ses pieds image par image. La courbe $y(t)$ donnée ci-dessous représente l'évolution de la position de John Young en fonction du temps pendant son saut sur la Lune. L'origine des dates, $t = 0$ s, est prise au début du saut.

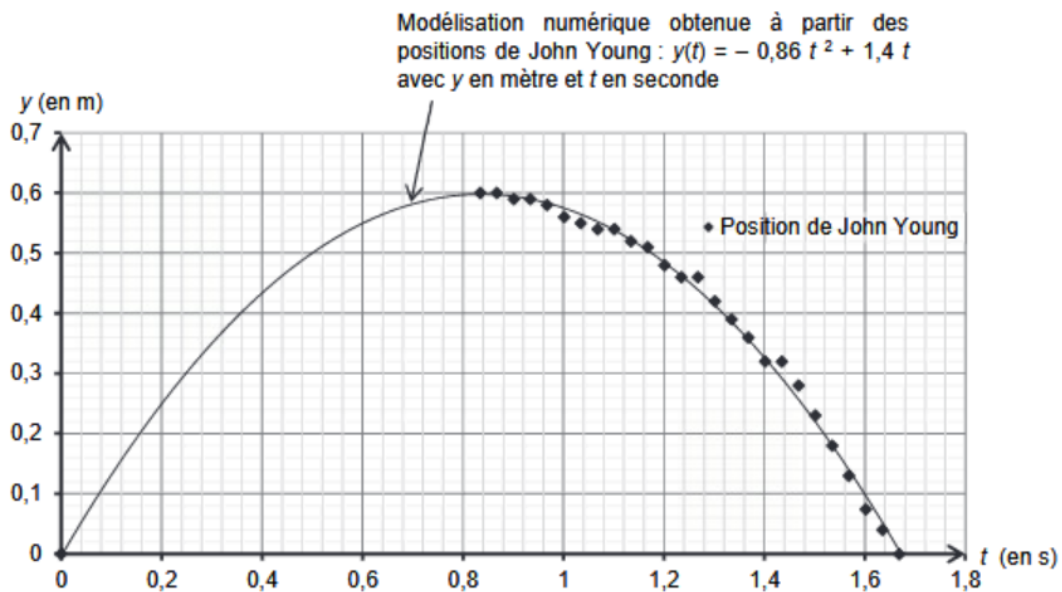


Figure 2. Évolution de la position y des pieds de John Young en fonction du temps t pendant son saut sur la Lune

En l'absence d'atmosphère sur la Lune, on considère que le saut de John Young est une chute libre verticale.

Pour informations, on a :

$$y(t) = \frac{a_y}{2} t^2 + 1,4 \cdot t$$

$$v_y(t) = a_y \cdot t + 1,4$$

- 3.1. D'après l'équation de la modélisation numérique, calculer la valeur de la vitesse initiale v_{0y} de John Young.
- 3.2. L'accélération est donnée par $a_y(t) = -1,72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
Montrer que c'est aussi l'opposé de la valeur de l'intensité de la pesanteur lunaire g_L .
- 3.3. John Young, avec son scaphandre, a une masse totale d'environ 150 kg et il parvient pourtant à faire un saut vertical de 60 cm sur la Lune. Déterminer les valeurs de la hauteur et de la durée d'un saut vertical qu'aurait réalisé John Young avec son équipement sur la Terre avec la vitesse initiale v_{0y} dans le cadre du modèle de la chute libre. Commenter.

EXERCICE 2 : Equation aux dimensions

Le nombre de Bansen Ba est un nombre sans dimension utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert d'énergie thermique par radiation et le transfert par convection.

On le définit de la manière suivante :

$$Ba = \frac{h_r S^a}{F^b c_p}$$

Avec :

- h_r : le coefficient de transfert thermique par radiation ($J.K^{-1}.s^{-1}.m^{-2}$)

- S : la surface de transfert

- F : le débit massique ($kg.s^{-1}$)

- c_p : la capacité thermique, qui représente la quantité d'énergie thermique que l'on doit transférer à un corps pour augmenter sa température ($J.K^{-1}.kg^{-1}$)

(Source : Wikipédia)

Puisque le nombre de Bansen est sans dimension, déterminez les constantes a et b .

Essais en Vol Istres
EPNER

Titre/Grade:

Nom:

Prénom:

Examen:

EXAMEN PROBATOIRE D'ADMISSION

AU STAGE ESSAIS

PARACHUTISTE D'ESSAIS ET DE RECEPTION

SESSION DU 15 NOVEMBRE 2021

CORRIGÉ ÉPREUVE ÉCRITE DE CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

Durée: 1h – Seule une calculatrice non programmable et non graphique est autorisée --
– Aucun document n'est autorisé pour cette épreuve – Ne rien écrire sur ce document

Document validé par :

Nom :

Date : 05/11/2021

Signature :

EXERCICE 1

Missions sur la Lune.

L'année 2019 a marqué le 50e anniversaire de la mission Apollo 11. En effet, le 20 juillet 1969, l'Homme marche pour la première fois sur la Lune. Le but de cet exercice est d'étudier différents aspects des missions Apollo 11 et 16 : le décollage depuis la Terre, la mise en orbite autour de la Lune et une expérience de détermination de la valeur de l'intensité de la pesanteur lunaire.



Équipage de la mission Apollo 11 en 1969
(de gauche à droite : N. Armstrong, M. Collins,
B. Aldrin)
Source : NASA



Équipage de la mission Apollo 16 en 1972
(de gauche à droite : T. Mattingly, J. Young,
C. Duke Jr.)
Source : NASA

Données :

- constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;
- masse de la Terre : $M_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$;
- masse de la Lune : $M_L = 7,34 \times 10^{22} \text{ kg}$;
- masse du vaisseau Apollo 11 avec son module lunaire : $m_1 = 4,50 \times 10^4 \text{ kg}$;
- rayon de la Terre : $R_T = 6,37 \times 10^3 \text{ km}$;
- rayon de la Lune : $R_L = 1,73 \times 10^3 \text{ km}$;
- intensité de pesanteur terrestre : $g_T = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Pour rappel : $10^3 = 1000$

1. Décollage depuis la Terre de la mission Apollo 11

La fusée Saturn V est composée de trois étages contenant du carburant. Lorsqu'ils sont vides, ces étages se décrochent au fur et à mesure de la progression de la fusée. Le 16 juillet 1969, la fusée Saturn V décolle de cap Canaveral en Floride en emportant l'équipage et le vaisseau Apollo 11 sur lequel est fixé un module lunaire. Elle met en orbite le vaisseau Apollo 11 qui effectue alors 1,5 tour autour de la Terre, afin de permettre la vérification de tous les paramètres du vol. Le vaisseau Apollo 11 est ensuite transféré sur une nouvelle trajectoire grâce au dernier étage de la fusée, qui va le mener à proximité de la Lune.

Pour toute cette partie, l'étude est effectuée dans le référentiel géocentrique dont l'origine est le centre de la Terre et dont les axes pointent vers des étoiles fixes ; le référentiel est supposé galiléen. La valeur de la vitesse du vaisseau Apollo 11 sur son orbite supposée circulaire de rayon $6,56 \times 10^3 \text{ km}$ (soit une altitude par rapport à la Terre de 190 km) vaut $v_h = 7,79 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le périmètre d'un cercle de rayon R est donné par $2\pi R$.

- 1.1. Calculer la valeur de la durée passée en orbite terrestre par l'équipage dans le vaisseau Apollo 11.

Le vaisseau parcourt 1,5 fois la tour de la Terre soit une distance de :

$$1,5 \cdot 2\pi \cdot 6\,560 = 61\,827 \text{ km} = 61\,827\,000 \text{ m}$$

Sachant que la vitesse du vaisseau est de $7\,790 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on a une durée passée en orbite de :

$$t = \frac{d}{v} = \frac{61\,827\,000}{7\,790} = 7\,937 \text{ s} = 132 \text{ min } 17 \text{ s}$$

- 1.2. La valeur de l'énergie potentielle de pesanteur du vaisseau Apollo 11 en orbite terrestre est $E_p = 8,39 \times 10^{10} \text{ J}$, l'origine de l'énergie potentielle de pesanteur étant prise nulle à la surface de la Terre (et la constante de gravité étant considérée constante et égale à $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

- 1.2.1. Calculer la valeur de l'énergie cinétique E_c du vaisseau en orbite terrestre.

On a l'énergie cinétique qui vaut :

$$E_c = \frac{1}{2} m_1 v_h^2 = \frac{1}{2} \cdot 4,50 \cdot 10^4 \cdot (7,79 \cdot 10^3)^2 = 1,37 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

- 1.2.2. En déduire la valeur de l'énergie mécanique E_m du vaisseau en orbite terrestre.

On a l'énergie mécanique qui est la somme des deux formes d'énergie précédentes :

$$E_m = E_c + E_p = 1,37 \cdot 10^{12} + 8,39 \cdot 10^{10} = 1,45 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

- 1.3. On considère que la valeur de l'énergie mécanique E_{m0} du vaisseau Apollo 11 avant le décollage est nulle : $E_{m0} = 0 \text{ J}$.

- 1.3.1. Déterminer l'énergie minimale que doit fournir Saturn V pour mettre en orbite terrestre le vaisseau Apollo 11 à sa vitesse de croisière. Conclure, sachant que la fusée Saturn V est un lanceur qui a la capacité de fournir une énergie de l'ordre de $5 \times 10^{12} \text{ J}$ pour mettre un corps en orbite autour de la Terre.

Lorsque le vaisseau est en orbite autour de la Terre, il a une énergie mécanique de $E_m = 1,45.10^{12} \text{ J}$ (cf question 1.2.2).

Si au départ il avait $E_{m0} = 0 \text{ J}$, c'est que le lanceur lui a fourni la quantité d'énergie :

$$E_m - E_{m0} = 1,45.10^{12} - 0 = 1,45.10^{12} \text{ J} < 5.10^{12} \text{ J}$$

Heureusement, le lanceur peut fournir l'énergie suffisante afin de mettre en orbite le vaisseau.

1.3.2. Expliquer pourquoi l'énergie mécanique du vaisseau avant le décollage n'est pas tout à fait nulle dans le référentiel géocentrique.

Le référentiel géocentrique est fixe par rapport à la Terre. Ainsi le vaisseau, lorsqu'il est posé au sol, bouge du fait de la rotation de la Terre, d'où une énergie cinétique du vaisseau non nulle au départ.

2. Michael Collins en orbite autour de la Lune lors de la mission Apollo 11

Le vaisseau Apollo 11 se trouve au voisinage de la Lune à une altitude $h_L = 110 \text{ km}$ par rapport au sol lunaire. À cet instant, le module lunaire se détache du vaisseau emportant à son bord les deux astronautes Buzz Aldrin et Neil Armstrong vers le sol lunaire. Le troisième astronaute Michael Collins reste seul en orbite dans le vaisseau qui est animé d'un mouvement supposé circulaire uniforme dans le référentiel d'étude centré sur la Lune et supposé galiléen. Libéré de son module, le vaisseau possède alors une masse m_2 qui n'est plus que de $3,0 \times 10^4 \text{ kg}$ environ. Les deux astronautes restent 21 h et 36 min sur le sol lunaire.

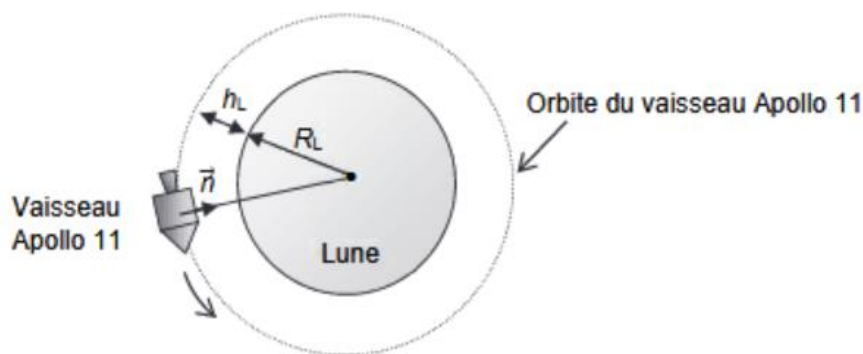


Figure 1. Vaisseau en orbite lunaire à une altitude h_L

On note $\vec{n}$ un vecteur unitaire choisi dans la direction vaisseau – centre de la Lune et dans le sens du vaisseau Apollo 11 vers la Lune (cf. figure 1). On considère que le vaisseau n'est soumis qu'à l'attraction de la Lune.

On rappelle que la force d'attraction d'un objet de masse m sur un objet de masse m' , dont les centres de gravité sont séparés d'une distance r s'écrit :

$$\vec{F} = G \frac{mm'}{r^2} \vec{u}$$

Avec $\vec{u}$ un vecteur partant du centre de gravité de l'objet de masse m' pointant vers le centre de gravité de l'objet de masse m .

- 2.1. En appliquant la deuxième loi de Newton, déterminer l'expression du vecteur accélération $\vec{a}$ du vaisseau Apollo 11 à l'altitude h_L dans le référentiel d'étude.

On applique le Principe Fondamental de la dynamique, sachant qu'on a seulement l'attraction de la Lune qui s'exerce sur le vaisseau soit :

$$m_2 \vec{a} = G \frac{M_L m_2}{(R_L + h_L)^2} \vec{n}$$

Soit simplement :

$$\vec{a} = G \frac{M_L}{(R_L + h_L)^2} \vec{n}$$

- 2.2. Donner la relation entre v , $R_L + h_L$ et ω la vitesse de rotation du vaisseau autour de la Lune en $rad.s^{-1}$.

On a simplement :

$$(R_L + h_L)\omega = v$$

Remarque :

Une analyse dimensionnelle permet de s'assurer que la relation est bonne :

$$[R_L + h_L] = m$$

$$[\omega] = s^{-1}$$

$$[v] = m.s^{-1}$$

L'accélération du vaisseau suivant l'axe $\vec{n}$ s'écrit aussi :

$$a = v\omega$$

- 2.3. Montrer que la norme de la vitesse v du vaisseau Apollo 11 à l'altitude h_L a pour expression :

$$v = \sqrt{\frac{GM_L}{R_L + h_L}}$$

Et donnez sa valeur.

D'après le PFD vu à la question 2.1, on a :

$$m_2 v\omega = m_2 a = G \frac{M_L m_2}{(R_L + h_L)^2}$$

Or :

$$\omega = \frac{v}{R_L + h_L} \rightarrow m_2 v\omega = m_2 \frac{v^2}{R_L + h_L}$$

D'où :

$$m_2 \frac{v^2}{R_L + h_L} = G \frac{M_L m_2}{(R_L + h_L)^2} \rightarrow v^2 = G \frac{M_L}{R_L + h_L}$$

Et donc :

$$v = \sqrt{\frac{GM_L}{R_L + h_L}} = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 7,34 \cdot 10^{22}}{1,73 \cdot 10^6 + 110 \cdot 10^3}} = 1\,631 \text{ m/s}$$

En n'oubliant pas de convertir les *km* en *m*.

- 2.4. Calculer la valeur de la période de révolution T du vaisseau Apollo 11, puis déterminer celle du nombre de tours autour de la Lune qu'a fait l'astronaute Michael Collins pendant le séjour des deux autres astronautes sur la Lune.

On a la période, temps pendant lequel le vaisseau fait le tour de la Lune, qui se calcule via la formule :

$$v = \frac{2\pi(R_L + h_L)}{T}$$

Soit :

$$T = \frac{2\pi(R_L + h_L)}{v} = \frac{2\pi(R_L + h_L)}{\sqrt{\frac{GM_L}{R_L + h_L}}} = \frac{2\pi \cdot (1,73 \cdot 10^6 + 110 \cdot 10^3)}{1\,631} = 7\,088 \text{ s}$$

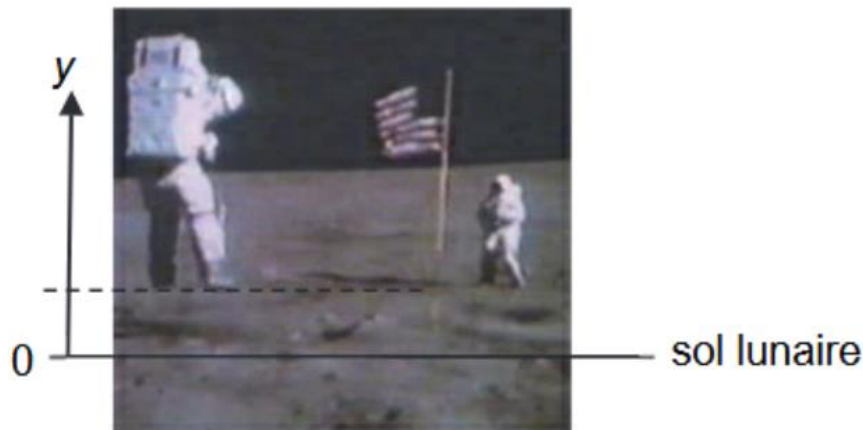
Michael Collins est resté en orbite autour de la Lune pendant 21 heures et 36 minutes soit :

$$21 \cdot 60 + 36 = 1296 \text{ min} = 77\,760 \text{ s}$$

Et a donc pu faire 11 fois le tour de la Lune puisque :

$$\frac{77\,760}{T} = \frac{77\,760}{7\,088} = 10,97$$

3. Saut de John Young lors de la mission Apollo 16



Source : NASA

Lors de la mission Apollo 16 en 1972, l'astronaute John Young fait un grand saut vertical. Cette scène a été filmée et la vidéo est exploitée grâce à un logiciel de pointage.

Une image de cette vidéo présentée ci-dessus montre John Young au point le plus haut du saut, ses pieds étant alors situés à 60 cm au-dessus du sol.

On choisit l'axe Oy vertical, orienté vers le haut, l'origine O de cet axe étant situé au niveau du sol lunaire. On repère la position de John Young selon cet axe en pointant la position de ses pieds image par image. La courbe $y(t)$ donnée ci-dessous représente l'évolution de la position de John Young en fonction du temps pendant son saut sur la Lune. L'origine des dates, $t = 0$ s, est prise au début du saut.

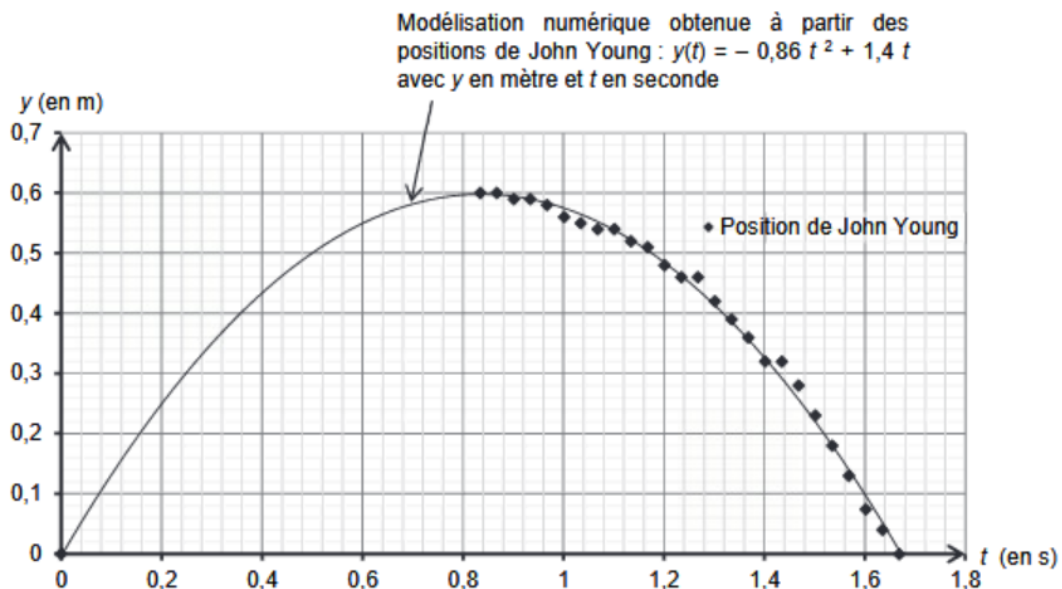


Figure 2. Évolution de la position y des pieds de John Young en fonction du temps t pendant son saut sur la Lune

En l'absence d'atmosphère sur la Lune, on considère que le saut de John Young est une chute libre verticale.

Pour information, on a :

$$y(t) = \frac{a_y}{2} t^2 + 1,4 \cdot t$$

$$v_y(t) = a_y \cdot t + 1,4$$

- 3.1. D'après l'équation de la modélisation numérique, calculer la valeur de la vitesse initiale v_{0y} de John Young.

A l'instant initial on a :

$$v_{0y} = v_y(t = 0) = 1,4 \text{ m/s}$$

- 3.2. L'accélération est donnée par $a_y(t) = -1,72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
Montrer que c'est aussi l'opposé de la valeur de l'intensité de la pesanteur lunaire g_L .

Lorsque l'on écrit le Principe Fondamental de la Dynamique, en sachant que la seule force s'exerçant sur l'astronaute est son poids, on a :

$$ma_y = -mg_L$$

D'où la valeur de g_L .

- 3.3. John Young, avec son scaphandre, a une masse totale d'environ 150 kg et il parvient pourtant à faire un saut vertical de 60 cm sur la Lune. Déterminer les valeurs de la hauteur et de la durée d'un saut vertical qu'aurait réalisé John Young avec son équipement sur la Terre avec la vitesse initiale v_{0y} dans le cadre du modèle de la chute libre. Commenter.

On a sur Terre :

$$a = -g = -9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Donc en intégrant par rapport au temps :

$$v_y(t) = -9,81 \cdot t + v_{0y} = -9,81 \cdot t + 1,4$$

Et en intégrant une seconde fois :

$$y(t) = -\frac{9,81}{2} \cdot t^2 + 1,4 \cdot t = \left(-\frac{9,81}{2} \cdot t + 1,4 \right) \cdot t$$

Ainsi, on a $y(t) = 0$ quand $t = 0 \text{ s}$ (début du saut...) et quand :

$$-\frac{9,81}{2} \cdot t + 1,4 = 0$$

Soit :

$$t = \frac{1,4}{\frac{9,81}{2}} = 0,29 \text{ s}$$

La hauteur maximale est atteinte lorsque $v_y(t) = 0$ soit :

$$t = \frac{1,4}{9,81} = 0,14 \text{ s}$$

Donc :

$$y(t = 0,14) = -0,86 \cdot 0,14^2 + 1,4 \cdot 0,14 = 0,18 \text{ m}$$

Ce qui est trois fois moins important que sur la Lune, dû à une attraction bien plus forte sur Terre.

EXERCICE 2

Equation aux dimensions.

Le nombre de Bansen Ba est un nombre sans dimension utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert d'énergie thermique par radiation et le transfert par convection.

On le définit de la manière suivante :

$$Ba = \frac{h_r S^a}{F^b c_p}$$

Avec :

- h_r : le coefficient de transfert thermique par radiation ($J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)

- S : la surface de transfert

- F : le débit massique ($kg \cdot s^{-1}$)

- c_p : la capacité thermique, qui représente la quantité d'énergie thermique que l'on doit transférer à un corps pour augmenter sa température ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$)

(Source : Wikipédia)

Puisque le nombre de Bansen est sans dimension, déterminez les constantes a et b .

On a les unités des différents paramètres :

$$\begin{aligned}[S] &= m^2 \\ [F] &= kg \cdot s^{-1} \\ [c_p] &= J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1} \\ [h_r] &= J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}\end{aligned}$$

Sachant que :

$$[Ba] = \left[\frac{h_r S^a}{F^b c_p} \right] = \frac{(J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}) \cdot (m^{2a})}{(kg^b \cdot s^{-b}) \cdot (J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1})} = kg^{1-b} \cdot s^{-1+b} \cdot m^{2a-2}$$

Donc :

$$1 - b = 0 \rightarrow b = 1$$

Et :

$$2a - 2 = 0 \rightarrow a = 1$$

Le nombre de Bansen s'écrit donc :

$$Ba = \frac{h_r S}{F c_p}$$

EXERCICE 4 (MNE)

Centrage.

On considère un avion dont on connaît la masse à vide m_v et la position du centre de gravité CG_v à vide par rapport à une ligne de référence.

On donne :

- $m_v = 4\,500\text{ kg}$

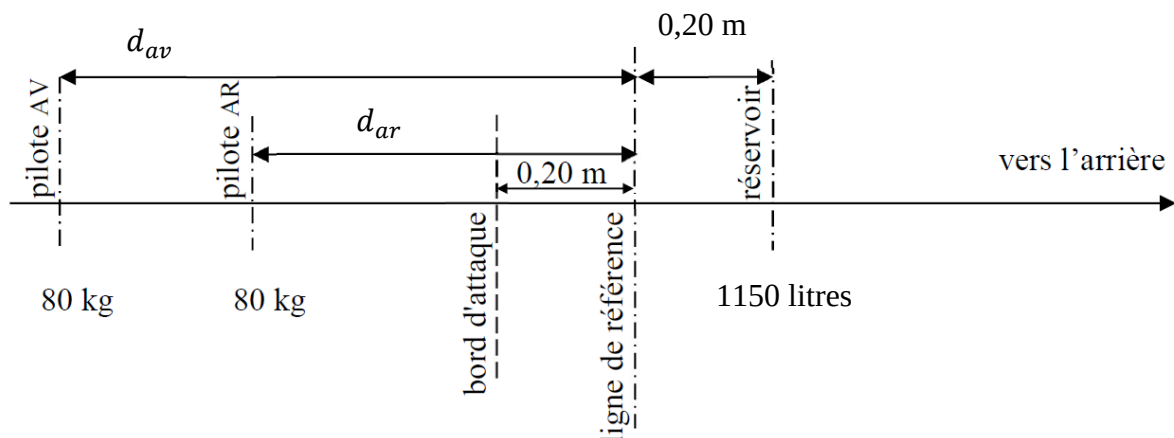
- $CG_v = 0,5\text{ m}$ vers l'arrière

-corde moyenne aérodynamique $CMA = 2,50\text{ m}$

-densité du carburant : $d = 0,7$

L'avion doit voler avec un pilote en place avant, un pilote en place arrière et 1150 litres de carburant 100LL dans le réservoir de fuselage.

Les positions des différents éléments ainsi que les masses (ou quantité de carburant) associées sont données par le dessin suivant :



Les pilotes sont séparés de 1,5 m.

À la mise en route pour un vol dans les conditions prévues, on sait que le centre de gravité de l'avion se situe à 38 cm vers l'arrière.

1- Quelle est la masse de l'avion ?

On a :

$$M_{avion} = 80.2 + 1150.0,7 + 4500 = 5465 \text{ kg}$$

2- A quelle distance de la ligne de référence se trouvent les pilotes ?

On a :

$$M_{avion}CG = M_{carbu} \cdot (-0,2) + M_{pilote}(d_{av} + d_{ar}) + m_v CG_v$$

Or :

$$d_{av} = d_{ar} + 1,5$$

Donc :

$$M_{avion}CG = M_{carbu} \cdot (-0,2) + M_{pilote}(2d_{ar} + 1,5) + m_v CG_v$$

Et donc :

$$M_{avion}CG - M_{carbu} \cdot (-0,2) - m_v CG_v = M_{pilote}(2d_{ar} + 1,5)$$

$$d_{ar} = \frac{1}{2} \left(\frac{M_{avion}CG - M_{carbu} \cdot (-0,2) - m_v CG_v}{M_{pilote}} - 1,5 \right)$$

$$d_{ar} = \frac{1}{2} \left(\frac{5465 \cdot (-0,38) - 1150.0,7 \cdot (-0,2) - 4500 \cdot (-0,5)}{80} - 1,5 \right) = 1,34 \text{ m}$$

3- Donnez l'expression de la position du CG en % de la CMA.

On a directement :

$$CG_{\%} = \frac{0,38}{2,50} 100 = 15,2 \%$$

4- Quelle est la quantité maximale de carburant que l'on peut mettre dans l'avion si la limite de centrage avant est à 15% ?

A 15% de la CMA on a la position du CG qui vaut :

$$\frac{CG}{2,50} 100 = 15 \rightarrow CG = \frac{15.2,50}{100} = 0,375 \text{ m}$$

Soit :

$$M_{avion} \cdot CG = M_{avion} \cdot (-0,375) = M_{carbu} \cdot (-0,2) + M_{pilote}(2d_{ar} + 1,5) + m_v CG_v$$

Avec :

$$M_{avion} = 2M_{pilote} + M_{carbu} + m_v$$

Donc :

$$(2M_{pilote} + M_{carbu} + m_v).(-0,375) = M_{carbu}.(-0,2) + M_{pilote}(2d_{ar} + 1,5) + m_v CG_v$$

Puis :

$$M_{carbu}.(-0,375 + 0,2) = (2M_{pilote} + m_v).0,375 + M_{pilote}(2d_{ar} + 1,5) + m_v CG_v$$

$$M_{carbu}.(-0,175) = M_{pilote}(2.0,375 + 2d_{ar} + 1,5) + m_v(CG_v + 0,375)$$

Soit :

$$M_{carbu} = \frac{1}{-0,175} [M_{pilote}(2.0,375 + 2d_{ar} + 1,5) + m_v(CG_v + 0,375)]$$

$$M_{carbu} = \frac{1}{-0,175} [80.(2.0,375 + 2.1,34 + 1,5) + 4500.(-0,5 + 0,375)] = 961 \text{ kg}$$

Soit :

$$\frac{961}{0,7} = 1373 \text{ L}$$



MINISTÈRE
DES ARMÉES

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Direction générale
de l'armement

Essais en Vol Istres
EPNER

Titre/Grade:

Nom:

Prénom:

Examen:

EXAMEN PROBATOIRE D'ADMISSION

AU STAGE ESSAIS

PARACHUTISTE D'ESSAIS ET DE RECEPTION

SESSION DU 2 AVRIL 2024

ÉPREUVE ÉCRITE DE CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

Durée: 1h – Seule une calculatrice non programmable et non graphique est autorisée --
– Aucun document n'est autorisé pour cette épreuve

Document validé par :

Nom : DROBYSZ Dimitri

Date : 21/03/2024

Signature :

Exercice 1 : Equation aux dimensions

On donne l'expression de la résultante des efforts aérodynamiques F s'appliquant sur un objet de surface caractéristique S , plongé dans un écoulement d'air de masse volumique ρ à vitesse V :

$$F = \frac{1}{2} \rho S V^2 K$$

Montrer que K est un nombre sans dimension.

Exercice 2 : Vol d'une montgolfière



Source : pixabay.com

Une montgolfière est un moyen de transport aérien constitué d'une nacelle pouvant contenir des passagers. Au-dessus de la nacelle, se trouvent :

- une enveloppe en nylon appelée le ballon dont on considère le volume constant ;
- un brûleur permettant de réaliser la combustion de propane dans le dioxygène de l'air ; ce propane est stocké dans des bonbonnes transportées dans la nacelle.

De nombreuses sorties sont proposées, d'une durée moyenne d'une heure. Une voiture est contrainte de suivre au sol la montgolfière pour récupérer les passagers et le matériel lors de l'atterrissage. En effet, le lieu d'atterrissage ne peut pas être connu de façon sûre au moment du départ : il est dépendant des conditions météorologiques.

Les objectifs de cet exercice sont :

- de déterminer la masse totale qu'il est possible d'embarquer dans la montgolfière ;
- de trouver l'autonomie de vol maximale possible avec la montgolfière.

On étudie dans cet exercice une enveloppe en nylon de modèle « M-77 » de 0,1 mm d'épaisseur, de volume $V = 2\,200\text{ m}^3$, à laquelle on accroche une nacelle de modèle « C-1 », de masse $m_{\text{nacelle}} = 56\text{ kg}$. La nacelle est capable d'embarquer jusqu'à trois personnes ainsi que quatre bonbonnes pesant chacune 40 kg et contenant 20 kg de propane chacune.

D'après le site Internet <https://escholarship.org/>

Données :

- intensité de la pesanteur terrestre : $g = 9,81\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- surface de l'enveloppe du ballon : $S = 847\text{ m}^2$;
- masse par unité de surface de l'enveloppe en nylon : $\varphi_{\text{nylon}} = 65\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;
- constante du gaz parfait : $R = 8,314\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- masse molaire de l'air : $M_{\text{air}} = 29,0\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
- le nombre de moles d'air dans l'enveloppe s'écrit n_{air} et s'exprime en mol ;
- la masse d'air dans l'enveloppe s'écrit m_{air} et s'exprime en kg.

1. Détermination de la masse totale qu'il est possible d'embarquer dans la montgolfière

Au cours d'un vol, la montgolfière se trouve à une altitude de $1,5\text{ km}$. On considère que la pression p à l'intérieur du ballon est égale à la pression à l'extérieur du ballon. La figure 1 présente l'évolution de la pression de l'air en fonction de l'altitude. L'air est considéré comme un gaz parfait. Le brûleur n'est pas actionné au moment où on étudie le système.

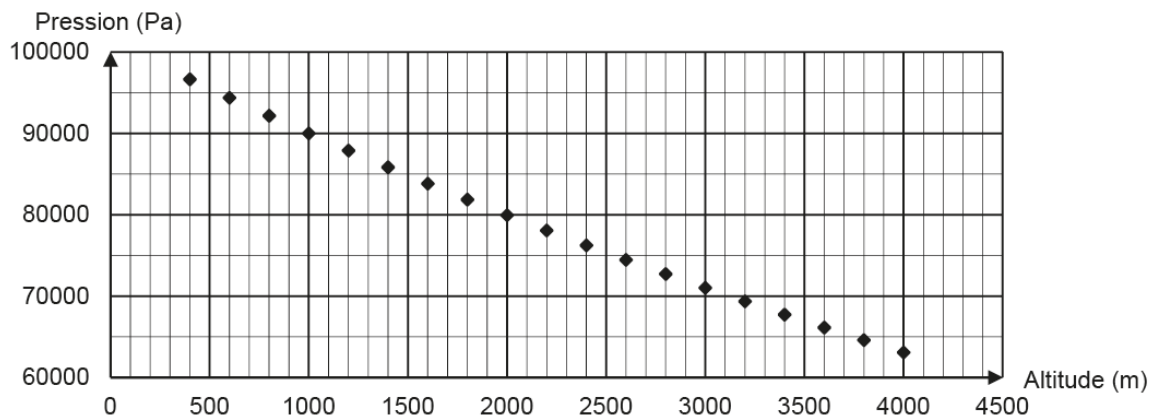


Figure 1. Pression de l'air en fonction de l'altitude

1.1. Étude du système « ballon ».

1.1.1. À l'aide de l'équation d'état du gaz parfait ($PV = nRT$), exprimer la masse volumique de l'air contenu dans le ballon ρ_{int} en fonction de la pression p , M_{air} , R et T , la température de l'air contenu dans le ballon.

1.1.2. Montrer que la valeur de la masse volumique de l'air contenu dans le ballon ρ_{int} lorsque le ballon est à une altitude de $1,5\text{ km}$ est de l'ordre de $0,8\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. On suppose que la température de l'air à l'intérieur du ballon à l'instant où on étudie le système est à 373 K .

1.2. Étude du système « montgolfière ».

On suit le déplacement du centre de masse G de la montgolfière. On se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen muni d'un repère d'espace $(O, \vec{i}, \vec{k})$ présenté sur la figure 2. L'origine au point O est au niveau du sol, au point de décollage de la montgolfière.



Figure 2. Système d'axes et vecteurs unitaires associés au référentiel terrestre

On considère qu'il s'exerce seulement deux forces sur le système {montgolfière} composé de la nacelle, de son chargement et du ballon :

- le poids $\vec{P}$;
- la poussée d'Archimède qui modélise l'action de l'air sur le ballon : $\vec{P}_A = \rho_{ext} V g \vec{k}$ où ρ_{ext} représente la masse volumique de l'air extérieur et V représente le volume total de la montgolfière, dont on considère qu'il est égal au volume du ballon.

On considère que la masse d'air présente dans le ballon est constante et que la montgolfière, de masse totale m , reste immobile. À la température locale et à l'altitude du vol de 1,5 km, la masse volumique de l'air extérieur au ballon vaut $1,06 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ tandis que la masse volumique de l'air à l'intérieur du ballon vaut $0,80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.2.1. Représenter les deux forces s'exerçant sur la montgolfière dans le cas où elle est immobile dans le référentiel terrestre, sans souci d'échelle en utilisant le système d'axes de la figure 2. Justifier.

1.2.2. Donner l'expression vectorielle du poids $\vec{P}$ de la montgolfière.

1.2.3. Établir l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède $\vec{P}_A$ en fonction de g , m et $\vec{k}$.

1.2.4. En déduire la masse totale embarquée dans la nacelle à cette altitude. Commenter.

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.

2. Détermination de l'autonomie maximale de vol de la montgolfière

En réalité, la montgolfière ne reste pas à une altitude constante. Son altitude varie autour d'une altitude moyenne, au gré de l'actionnement du brûleur par le pilote. L'utilisation du brûleur est nécessaire pour maintenir une altitude moyenne constante. On considère que la montgolfière est en vol, stabilisée à une altitude moyenne de $1,5 \text{ km}$. La température extérieure est $T_{ext} = 278 \text{ K}$ au cours d'un vol. On cherche à établir le bilan énergétique entre le système {air à l'intérieur de l'enveloppe + enveloppe} et le milieu extérieur.

2.1. Nommer les trois modes de transferts thermiques. Caractériser qualitativement ces trois modes.

La figure 3 présente les transferts thermiques qui ont lieu entre le système {ballon} et le milieu extérieur. On rappelle que le ballon représente l'enveloppe en nylon et l'air contenu à l'intérieur. En régime stationnaire, la montgolfière est en équilibre thermique.

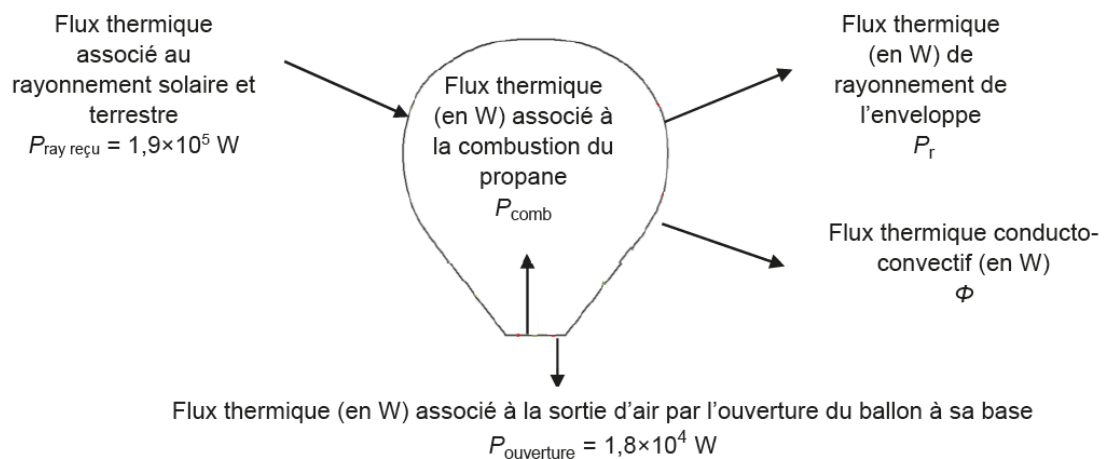


Figure 3. Bilan de puissance du système

2.2. À l'aide de la figure 3, établir une relation littérale entre les flux thermiques impliqués pour le système lorsque la montgolfière est à l'équilibre thermique.

Une partie du transfert thermique a lieu sous forme de rayonnement de l'enveloppe vers le milieu extérieur.

Le calcul du flux thermique rayonné se fait grâce à la relation de Stefan-Boltzmann :

$$P_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \text{ avec :}$$

- P_r le flux thermique rayonné ;
- ε le coefficient d'émissivité constant sans unité, pour l'enveloppe du ballon : $\varepsilon = 0,87$;
- σ la constante de Stefan : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;
- S la surface de l'enveloppe ;
- T la température de surface de l'enveloppe en K .

De plus, les mouvements de l'air extérieur le long de l'enveloppe sont à l'origine d'un flux thermique transféré vers l'extérieur par un phénomène de conducto-convection que l'on peut calculer grâce à la relation suivante :

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

- Φ représente le flux thermique perdu par le système par conducto-convection en W ;
- ΔT représente la différence de température entre l'enveloppe et le milieu extérieur en K ;
- R_{th} représente la résistance thermique associée au flux thermique entre l'enveloppe et le milieu extérieur : $R_{th} = 3,5 \times 10^{-4} K \cdot W^{-1}$.

D'après l'étude, dans ces conditions, la température de l'enveloppe vaut $T = 325 K$, température intermédiaire entre celle de l'air à l'intérieur du ballon et celle de l'air à l'extérieur du ballon.

2.3. Calculer le flux thermique par rayonnement P_r émis par l'enveloppe vers le milieu extérieur.

2.4. Calculer le flux conducto-convectif Φ .

2.5. En déduire que la valeur du flux thermique P_{comb} associé à la combustion du propane en régime de croisière est de l'ordre de $4 \times 10^5 W$.

Le flux thermique associé à la combustion du propane n'est pas libéré de façon continue. En effet, la combustion du propane n'a lieu que lorsque le brûleur fonctionne. L'énergie de combustion massique du propane est : $E_{comb} = 46,4 MJ \cdot kg^{-1}$.

Le pilote actionne le brûleur pendant une durée τ selon le fonctionnement décrit sur la figure 4.

Lorsque le brûleur est en fonctionnement, 68 grammes de propane sont brûlés chaque seconde.

2.6. Montrer que le flux thermique associé à la combustion du propane lorsque le brûleur est en fonctionnement est de l'ordre de $3 \times 10^6 W$.

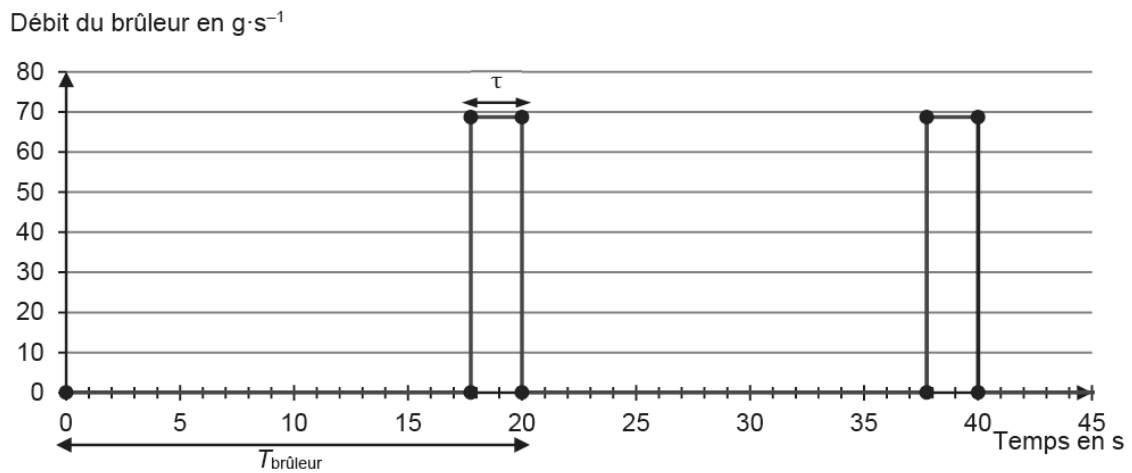


Figure 4. Débit de sortie du propane du brûleur en fonction du temps

2.7. Dans les conditions de l'étude, déterminer la durée maximale de vol qu'il est possible de réaliser à l'aide du propane embarqué dans la montgolfière. Commenter.

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.



MINISTÈRE
DES ARMÉES

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Direction générale
de l'armement

Essais en Vol Istres
EPNER

Titre/Grade:

Nom:

Prénom:

Examen:

EXAMEN PROBATOIRE D'ADMISSION

AU STAGE ESSAIS

PARACHUTISTE D'ESSAIS ET DE RECEPTION

SESSION DU 2 AVRIL 2024

CORRIGÉ ÉPREUVE ÉCRITE DE CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

Durée: 1h – Seule une calculatrice non programmable et non graphique est autorisée --
– Aucun document n'est autorisé pour cette épreuve

Document validé par :

Nom : DROBYSZ Dimitri

Date : 21/03/2024

Signature :

Exercice 1 : Equation aux dimensions

On donne l'expression de la résultante des efforts aérodynamiques F s'appliquant sur un objet de surface caractéristique S , plongé dans un écoulement d'air de masse volumique ρ à vitesse V :

$$F = \frac{1}{2} \rho S V^2 K$$

Montrer que K est un nombre sans dimension.

On a :

$$[F] = N = kg.m.s^{-2}$$

$$[\rho] = kg.m^{-3}$$

$$[S] = m^2$$

$$[V^2] = m^2.s^{-2}$$

Donc :

$$\left[\frac{F}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \right] = \frac{kg.m.s^{-2}}{kg.m^{-3}.m^2.m^2.s^{-2}} = 1$$

On trouve donc bien que K est un nombre sans dimension.

Exercice 2 : Vol d'une montgolfière



Source : pixabay.com

Une montgolfière est un moyen de transport aérien constitué d'une nacelle pouvant contenir des passagers. Au-dessus de la nacelle, se trouvent :

- une enveloppe en nylon appelée le ballon dont on considère le volume constant ;
- un brûleur permettant de réaliser la combustion de propane dans le dioxygène de l'air ; ce propane est stocké dans des bonbonnes transportées dans la nacelle.

De nombreuses sorties sont proposées, d'une durée moyenne d'une heure. Une voiture est contrainte de suivre au sol la montgolfière pour récupérer les passagers et le matériel lors de l'atterrissage. En effet, le lieu d'atterrissage ne peut pas être connu de façon sûre au moment du départ : il est dépendant des conditions météorologiques.

Les objectifs de cet exercice sont :

- de déterminer la masse totale qu'il est possible d'embarquer dans la montgolfière ;
- de trouver l'autonomie de vol maximale possible avec la montgolfière.

On étudie dans cet exercice une enveloppe en nylon de modèle « M-77 » de $0,1\text{ mm}$ d'épaisseur, de volume $V = 2\,200\text{ m}^3$, à laquelle on accroche une nacelle de modèle « C-1 », de masse $m_{\text{nacelle}} = 56\text{ kg}$. La nacelle est capable d'embarquer jusqu'à trois personnes ainsi que quatre bonbonnes pesant chacune 40 kg et contenant 20 kg de propane chacune.

D'après le site Internet <https://escholarship.org/>

Données :

- intensité de la pesanteur terrestre : $g = 9,81\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- surface de l'enveloppe du ballon : $S = 847\text{ m}^2$;
- masse par unité de surface de l'enveloppe en nylon : $\varphi_{\text{nylon}} = 65\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;
- constante du gaz parfait : $R = 8,314\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- masse molaire de l'air : $M_{\text{air}} = 29,0\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
- le nombre de moles d'air dans l'enveloppe s'écrit n_{air} et s'exprime en mol ;
- la masse d'air dans l'enveloppe s'écrit m_{air} et s'exprime en kg .

1. Détermination de la masse totale qu'il est possible d'embarquer dans la montgolfière

Au cours d'un vol, la montgolfière se trouve à une altitude de 1,5 km. On considère que la pression p à l'intérieur du ballon est égale à la pression à l'extérieur du ballon. La figure 1 présente l'évolution de la pression de l'air en fonction de l'altitude. L'air est considéré comme un gaz parfait. Le brûleur n'est pas actionné au moment où on étudie le système.

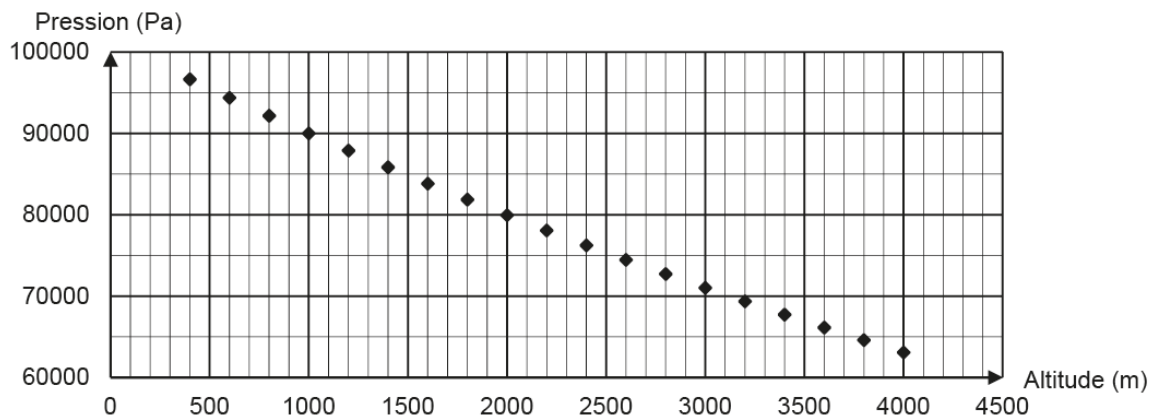


Figure 1. Pression de l'air en fonction de l'altitude

1.1. Étude du système « ballon ».

1.1.1. À l'aide de l'équation d'état du gaz parfait ($PV = nRT$), exprimer la masse volumique de l'air contenu dans le ballon ρ_{int} en fonction de la pression p , M_{air} , R et T , la température de l'air contenu dans le ballon.

On a :

$$pV_{int} = n_{air}RT$$

Soit :

$$p \frac{m_{air}}{\rho_{int}} = n_{air}RT$$

$$\frac{p}{\rho_{int}} = \frac{n_{air}}{m_{air}}RT$$

$$\frac{p}{\rho_{int}} = \frac{1}{M_{air}}RT$$

$$\rho_{int} = \frac{p}{RT} M_{air}$$

1.1.2. Montrer que la valeur de la masse volumique de l'air contenu dans le ballon ρ_{int} lorsque le ballon est à une altitude de 1,5 km est de l'ordre de $0,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. On suppose que la température de l'air à l'intérieur du ballon à l'instant où on étudie le système est à 373 K.

D'après la figure 1, à 1,5 km d'altitude, on a $p = 85\,000\text{ Pa}$.

Donc :

$$\rho_{int} = \frac{85\,000}{8,314,373} 29 \cdot 10^{-3} = 0,795\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Attention à bien passer la masse molaire de l'air en kg, d'où le 10^{-3} dans le calcul.

1.2. Étude du système « montgolfière ».

On suit le déplacement du centre de masse G de la montgolfière. On se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen muni d'un repère d'espace $(O, \vec{i}, \vec{k})$ présenté sur la figure 2. L'origine au point O est au niveau du sol, au point de décollage de la montgolfière.



Figure 2. Système d'axes et vecteurs unitaires associés au référentiel terrestre

On considère qu'il s'exerce seulement deux forces sur le système {montgolfière} composé de la nacelle, de son chargement et du ballon :

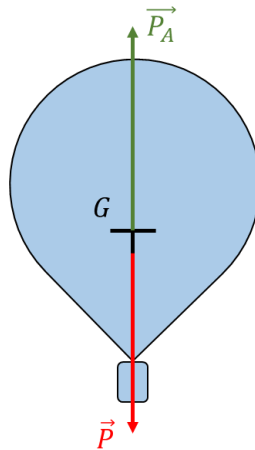
- le poids $\vec{P}$;
- la poussée d'Archimède qui modélise l'action de l'air sur le ballon : $\vec{P}_A = \rho_{ext} V g \vec{k}$ où ρ_{ext} représente la masse volumique de l'air extérieur et V représente le volume total de la montgolfière, dont on considère qu'il est égal au volume du ballon.

On considère que la masse d'air présente dans le ballon est constante et que la montgolfière, de masse totale m , reste immobile. À la température locale et à l'altitude du vol de 1,5 km, la masse volumique de l'air extérieur au ballon vaut $1,06\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ tandis que la masse volumique de l'air à l'intérieur du ballon vaut $0,80\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.2.1. Représenter les deux forces s'exerçant sur la montgolfière dans le cas où elle est immobile dans le référentiel terrestre, sans souci d'échelle en utilisant le système d'axes de la figure 2. Justifier.

Puisque la montgolfière est immobile, les forces s'exerçant sur elle s'équilibrent.

On a le schéma suivant :



1.2.2. Donner l'expression vectorielle du poids $\vec{P}$ de la montgolfière.

D'après le Principe Fondamental de la Dynamique, on a :

$$\vec{P} + \vec{P}_A = \vec{0} \rightarrow \vec{P} = -\vec{P}_A = -\rho_{ext} V g \vec{k}$$

1.2.3. Établir l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède $\vec{P}_A$ en fonction de g, m et $\vec{k}$.

D'après la question précédente, on a :

$$\vec{P}_A = -\vec{P} = -mg\vec{k}$$

1.2.4. En déduire la masse totale embarquée dans la nacelle à cette altitude. Commenter.

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.

On a :

$$\rho_{ext} V g = mg$$

Soit :

$$m = \rho_{ext} V = 1,06.2\,200 = 2\,332\,kg$$

L'air dans l'enveloppe prend :

$$m_{air} = \rho_{int} V = 1750\,kg$$

L'enveloppe :

$$m_{env} = \varphi_{nylon} S = 65.10^{-3}.847 = 55\,kg$$

La nacelle :

$$56\,kg$$

Soit la masse totale embarquée :

$$2\,332 - 1750 - 56 - 55 = 470\text{ kg}$$

Sachant que les bonbonnes pèsent :

$$160\text{ kg}$$

On a la masse des passagers embarqués :

$$470 - 160 = 310\text{ kg}$$

Ce qui est correct pour trois personnes (en moyenne 80 kg).

2. Détermination de l'autonomie maximale de vol de la montgolfière

En réalité, la montgolfière ne reste pas à une altitude constante. Son altitude varie autour d'une altitude moyenne, au gré de l'actionnement du brûleur par le pilote. L'utilisation du brûleur est nécessaire pour maintenir une altitude moyenne constante. On considère que la montgolfière est en vol, stabilisée à une altitude moyenne de 1,5 km. La température extérieure est $T_{ext} = 278\text{ K}$ au cours d'un vol.

On cherche à établir le bilan énergétique entre le système {air à l'intérieur de l'enveloppe + enveloppe} et le milieu extérieur.

2.1. Nommer les trois modes de transferts thermiques. Caractériser qualitativement ces trois modes.

Rayonnement (à distance), conduction (de proche en proche), convection (mouvement).

La figure 3 présente les transferts thermiques qui ont lieu entre le système {ballon} et le milieu extérieur. On rappelle que le ballon représente l'enveloppe en nylon et l'air contenu à l'intérieur. En régime stationnaire, la montgolfière est en équilibre thermique.

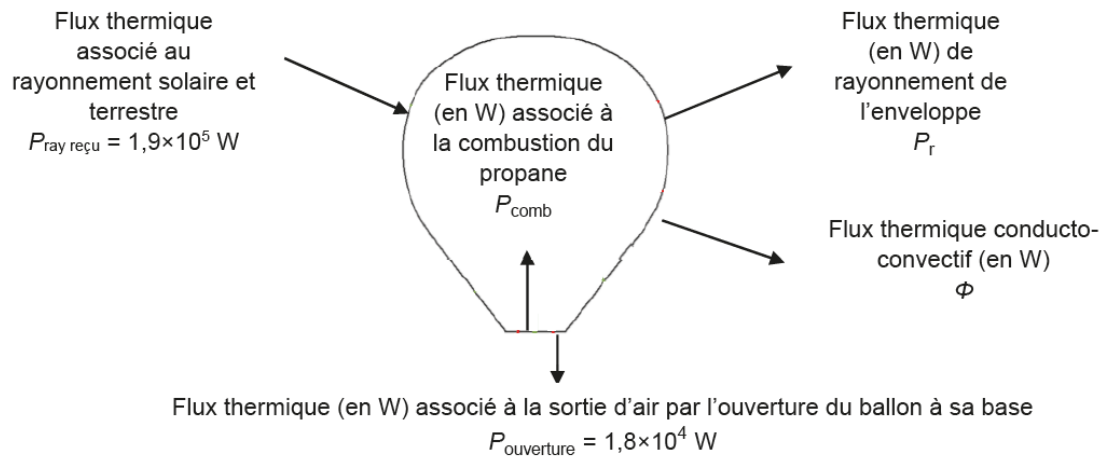


Figure 3. Bilan de puissance du système

2.2. À l'aide de la figure 3, établir une relation littérale entre les flux thermiques impliqués pour le système lorsque la montgolfière est à l'équilibre thermique.

La montgolfière étant en équilibre thermique, on écrit le bilan des flux :

$$P_{ray\ reçu} + P_{comb} = P_r + \Phi + P_{ouverture}$$

Ce qui est reçu par le système est égal à ce qui est donné.

Une partie du transfert thermique a lieu sous forme de rayonnement de l'enveloppe vers le milieu extérieur.

Le calcul du flux thermique rayonné se fait grâce à la relation de Stefan-Boltzmann :

$$P_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \text{ avec :}$$

- P_r le flux thermique rayonné ;
- ε le coefficient d'émissivité constant sans unité, pour l'enveloppe du ballon : $\varepsilon = 0,87$;
- σ la constante de Stefan : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;
- S la surface de l'enveloppe ;
- T la température de surface de l'enveloppe en K .

De plus, les mouvements de l'air extérieur le long de l'enveloppe sont à l'origine d'un flux thermique transféré vers l'extérieur par un phénomène de conducto-convection que l'on peut calculer grâce à la relation suivante :

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

- Φ représente le flux thermique perdu par le système par conducto-convection en W ;
- ΔT représente la différence de température entre l'enveloppe et le milieu extérieur en K ;
- R_{th} représente la résistance thermique associée au flux thermique entre l'enveloppe et le milieu extérieur : $R_{th} = 3,5 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

D'après l'étude, dans ces conditions, la température de l'enveloppe vaut $T = 325 \text{ K}$, température intermédiaire entre celle de l'air à l'intérieur du ballon et celle de l'air à l'extérieur du ballon.

2.3. Calculer le flux thermique par rayonnement P_r émis par l'enveloppe vers le milieu extérieur.

On utilise directement la formule avec les données de l'exercice :

$$P_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 = 0,875,67 \times 10^{-8} \cdot 847 \cdot 325^4 = 4,7 \cdot 10^5 \text{ W}$$

2.4. Calculer le flux conducto-convectif Φ .

On utilise directement la formule avec les données de l'exercice :

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{325 - 278}{3,5 \cdot 10^{-4}} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ W}$$

2.5. En déduire que la valeur du flux thermique P_{comb} associé à la combustion du propane en régime de croisière est de l'ordre de $4 \times 10^5 \text{ W}$.

On réutilise la formule de la question 2.2 :

$$P_{ray \text{ reçu}} + P_{comb} = P_r + \Phi + P_{ouverture}$$

$$P_{comb} = P_r + \Phi + P_{ouverture} - P_{ray \text{ reçu}}$$

$$P_{comb} = 4,7 \cdot 10^5 + 1,3 \cdot 10^5 + 1,8 \cdot 10^4 - 1,9 \cdot 10^5 = 4,3 \cdot 10^5 \text{ W}$$

Le flux thermique associé à la combustion du propane n'est pas libéré de façon continue. En effet, la combustion du propane n'a lieu que lorsque le brûleur fonctionne. L'énergie de combustion massique du propane est : $E_{comb} = 46,4 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Le pilote actionne le brûleur pendant une durée τ selon le fonctionnement décrit sur la figure 4.

Lorsque le brûleur est en fonctionnement, 68 grammes de propane sont brûlés chaque seconde.

2.6. Montrer que le flux thermique associé à la combustion du propane lorsque le brûleur est en fonctionnement est de l'ordre de $3 \times 10^6 \text{ W}$.

On calcule le flux thermique avec brûleur en action comme suit :

$$P_{comb} = \frac{m_{prop} E_{comb}}{\tau}$$

Sachant que la masse de propane brûlée pendant $\tau \text{ s}$ vaut :

$$m_{prop} = 68 \cdot 10^{-3} \cdot \tau$$

Ainsi :

$$P_{comb} = 68 \cdot 10^{-3} \cdot E_{comb} = 68 \cdot 10^{-3} \cdot 46,4 \cdot 10^6 = 3,2 \cdot 10^6 \text{ W}$$

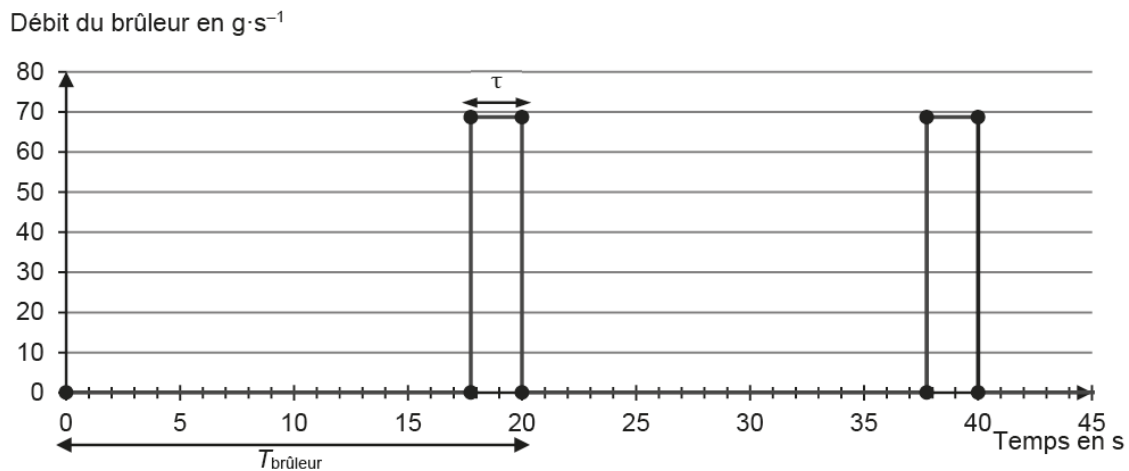


Figure 4. Débit de sortie du propane du brûleur en fonction du temps

2.7. Dans les conditions de l'étude, déterminer la durée maximale de vol qu'il est possible de réaliser à l'aide du propane embarqué dans la montgolfière. Commenter.

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.

Les bonbonnes contiennent 80 kg de propane au total.

Toutes les 20 s, le pilote actionne 2 s le brûleur, qui fait perdre :

$$m_{prop} = 68 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 0,136 \text{ kg}$$

Donc on calcule combien de tranches de 20 s on a pour 80 kg de propane :

$$\frac{80}{0,136} = 588$$

Soit :

$$11\,765 \text{ s} = 3,27 \text{ h}$$

Soit globalement :

$$3\text{h}15$$