DS DE PHYSIQUE N°1

- ✓ *La durée de l'épreuve est de 3h.*
- ✓ *Ce devoir comporte deux problèmes indépendants :*

NB. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

RAPPEL DES CONSIGNES

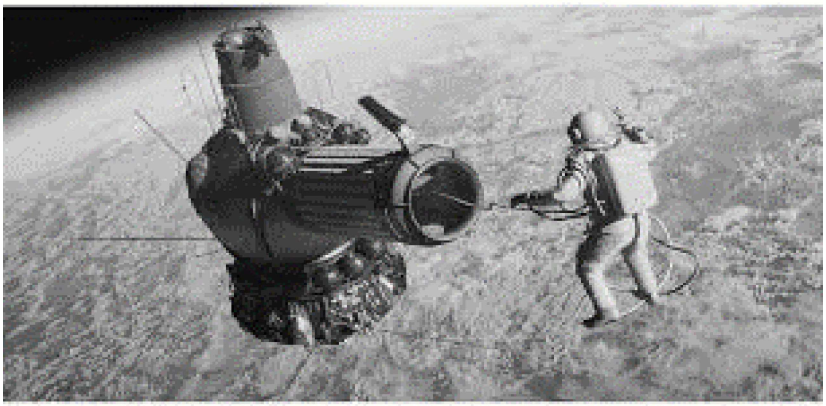
→Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.

→Ne pas utiliser de correcteur.

Les calculatrices sont autorisées

18 mars 1965 : le premier piéton de l'espace

Le sujet traite des " aventures " du premier piéton de l'espace Alexeï Arkhipovitch Leonov (1934-2019) qui réalisa la première sortie extravéhiculaire dans le vide spatial à partir d'un véhicule appelé Voskhod-2 (**photo ci-dessous**). Cette mission a lancé l'aventure des activités qui actuellement rendent possible la maintenance de la station spatiale internationale (ISS).



Photographie extraite du film " the spacewalker " (2017)

Le sujet est inspiré du film " the spacewalker " (2017). Leonov a supervisé le scenario, rétablissant la vérité sur les difficultés de cet exploit et les grands dangers que son pilote et lui avaient encourus. La parole était libérée au moment du tournage puisque la guerre froide était révolue.

La **partie I** s'intéresse à la préparation des cosmonautes avant leur mission (mécanique).

La **partie II** s'intéresse à la mise sur orbite du vaisseau Voskhod-2 (mécanique).

La **partie III** s'intéresse à la possibilité de rattraper le bouchon de caméra que Leonov a jeté dans l'espace (mécanique sous forme de **problème**).

La **partie IV** s'intéresse aux énormes difficultés de son retour dans le Voskhod-2 à cause des limites du corps humain (thermodynamique, chimie).

La **partie V** s'intéresse aux communications entre le vaisseau et le centre terrestre (électromagnétisme et optique).

La **partie VI** s'intéresse aux difficultés de maintien de la température du corps des cosmonautes après l'atterrissage dans l'Oural (thermodynamique).

La **partie VII** s'intéresse au pergélisol (thermodynamique).

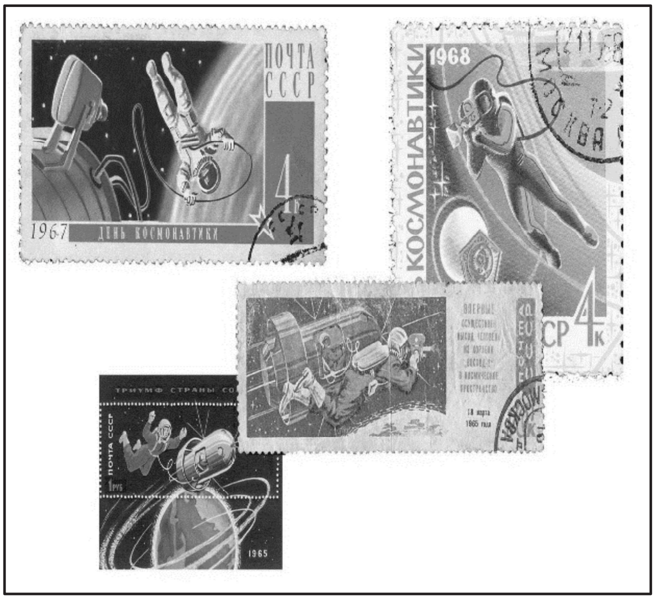
La **partie VIII** s'intéresse au thermokarst dû aux bulles de méthane (chimie).

La **partie IX** s'intéresse aux richesses minières de la Sibérie et à leur exploitation (chimie). Les sous-parties sont indépendantes.

Par commodité de représentation, les figures ne sont jamais faites à l'échelle.

*Le récit du film, le " piéton " (l'aventure réelle des deux cosmonautes, Alexeï Leonov et son pilote Pavel Belaîetch, **illustrations ci-après**) est indiqué par une écriture en caractères italiques.*

Photographie " Le Courrier " (Juin 1965)



Partie I - Préparation des cosmonautes

Donnée de la partie I
Accélération de la pesanteur à la surface de la Terre : $g_0 = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

Leonov, tête brulée mais bon pilote, se fait remarquer en " sauvant " un avion dans des conditions exceptionnelles. Il accepte les sollicitations de sa hiérarchie pour devenir le cosmonaute appelé à une sortie dans l'espace. Après les exploits, entre autres, des 108 minutes légendaires autour de la Terre de Youri Gagarine en avril 1961 et de Valentina Terechkova en 1963 (le premier homme et la première femme réalisant un vol spatial), les Soviétiques ne sont pas vraiment prêts. Ils veulent réaliser une sortie dans l'espace avant les Américains qui mettent de gros moyens pour détrôner les Russes. Au début du film, on voit quelques images de leur entrainement.

Les pilotes doivent se préparer physiquement aussi bien aux effets de forte accélération qu'à celui de l'apesanteur. Dans la fusée, après le départ, ils subissent une accélération de $4g_0$ et dans la phase de retour dans l'atmosphère, une décélération de $-10\,g_0$.

Remarque : cela signifie que leur poids apparent vaut respectivement $4\,mg_0\vec{u}$ et $-10\,mg_0\vec{u}$ si m est leur masse et $\vec{u}$ le vecteur unitaire de la direction du poids apparent orienté dans le même sens que la projection du poids.

Q1. Définir la force poids d'une masse m sur Terre en considérant le référentiel terrestre R galiléen. Définir la force d'inertie, puis le poids apparent dans un référentiel R' en mouvement accéléré par rapport au référentiel terrestre (accélération notée $\overrightarrow{\Upsilon_e}$).

Q2. L'entrainement utilise des " centrifugeuses " en rotation uniforme autour d'un axe fixe à la vitesse angulaire ω.
Définir ce qu'on appelle la force d'inertie centrifuge.
Des cosmonautes font des mouvements de révolution sur des balançoires (**figure 1**) qui tournent à la vitesse angulaire ω autour d'un axe horizontal Δ.
À quels poids apparents extrêmes sont-ils soumis ?

On suppose que sur ces balançoires, le centre de masse du gymnaste solidaire du siège est à une distance de $r = 2\ \text{m}$ de l'axe de rotation horizontal.

À quelle vitesse angulaire ω faut-il tourner pour obtenir un poids apparent de norme de $4mg_0$ au maximum ?

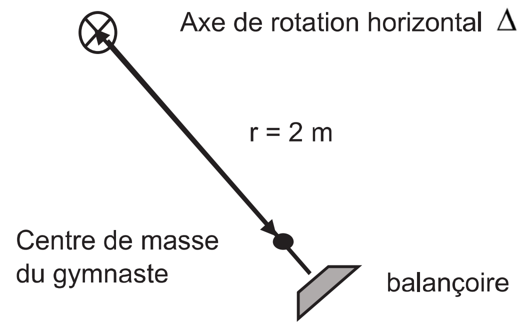


Figure 1 - Balançoire

L'entrainement à l'apesanteur se faisait pour les cosmonautes au cours d'un vol parabolique dans un avion Tupolev (**figure 2**). *Leonov a participé 117 fois à cet entrainement.*

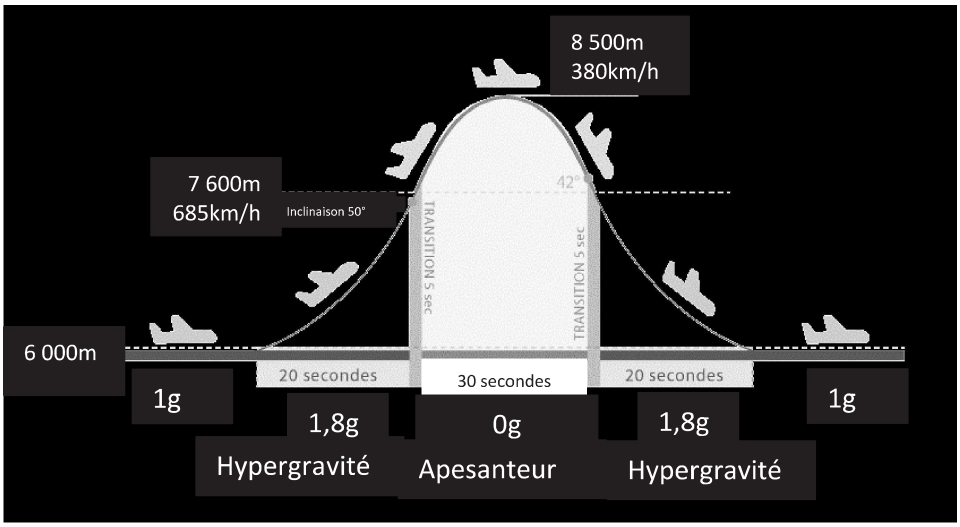


Illustration extraite du site airzerog.com/fr/

Figure 2 - Vol zéro-g

Lors d'un vol parabolique, ou vol zéro-g, (**figure 2**) les pilotes de l'avion effectuent une trentaine de fois une manœuvre particulière dite " manœuvre parabolique " au cours de laquelle l'état d'apesanteur est recréé à bord pendant 30 secondes.

Q3. La portion parabolique de la trajectoire de l'avion doit être confondue avec la parabole de chute libre de même sommet.

a) Expliquer pourquoi il y a apesanteur dans cette partie de la trajectoire.

b) Vérifier la valeur de la durée de l'apesanteur à partir des caractéristiques du début du mouvement parabolique ($V_0 = 685\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, inclinaison par rapport au plan horizontal $\alpha = 50°$).

Partie II - Mise en orbite de Voskhod-2

Données de la partie II
<u>Notations</u> Constante de gravitation universelle : G Masse de la Terre : M_T <u>Valeurs numériques</u> Rayon de la Terre : $R_T = 6\,370$ km Vitesse angulaire de rotation de la Terre sur elle-même : $\omega_T = 7{,}29 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{rad \cdot s^{-1}}$ Accélération de pesanteur à la surface de la Terre : $g_0 = \dfrac{GM_T}{R_T^2} = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

On voit les deux cosmonautes, vêtus de leur combinaison, monter à bord du vaisseau spatial placé dans la fusée. Le lancement de la fusée qui transporte la cabine Voskhod-2 se fait depuis le cosmodrome de Baïkonour au Kazakhstan situé à la latitude $45°57'53''$ Nord dans une zone désertique propice aux communications radio.

Q4. Le vaisseau libéré par la fusée décrit dans le référentiel géocentrique une orbite elliptique dont la distance minimale au foyer est à l'altitude de 167 km et dont la distance maximale au foyer est à l'altitude de 475 km. Que vaut son demi-grand axe a ?
Par la suite, on assimile l'orbite à un cercle de rayon a : évaluer la vitesse du satellite en $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$ et la période T du satellite en heure.

Q5. **a)** Quelle énergie faut-il dans le référentiel géocentrique pour placer le satellite sur l'orbite circulaire de rayon a ? On l'exprimera avec le rayon de l'orbite a, le rayon de la Terre R_T, la masse du satellite m, l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre g_0, la vitesse angulaire de rotation de la Terre ω_T et la latitude λ de la base de lancement. Faire l'application numérique pour une masse $m = 1\,000$ kg.

b) En réalité l'énergie à fournir à la fusée est beaucoup plus grande. Expliquer pour quelle(s) raison(s).

Dans le centre technique de Baïkonour, on entend les scientifiques dirent que les deux pilotes vont quitter la zone de visibilité.

Q6. Le satellite V (Voskhod), supposé ponctuel, a une orbite circulaire de rayon a autour de la Terre de centre C (**figure 3**). On appelle B le point qui se confond avec Baïkonour sur la surface de la Terre et Q la projection verticale de B sur l'orbite de V. La durée de visibilité θ du vaisseau V par le centre technique B correspond à l'intervalle de temps entre son apparition en A à l'horizon de B et sa disparition en D à l'horizon de B.
Exprimer le rapport entre cette durée de visibilité θ et la période de révolution T, en fonction de a et de R_T, en " oubliant " la rotation de la Terre. Calculer la valeur numérique de $\dfrac{\theta}{T}$.

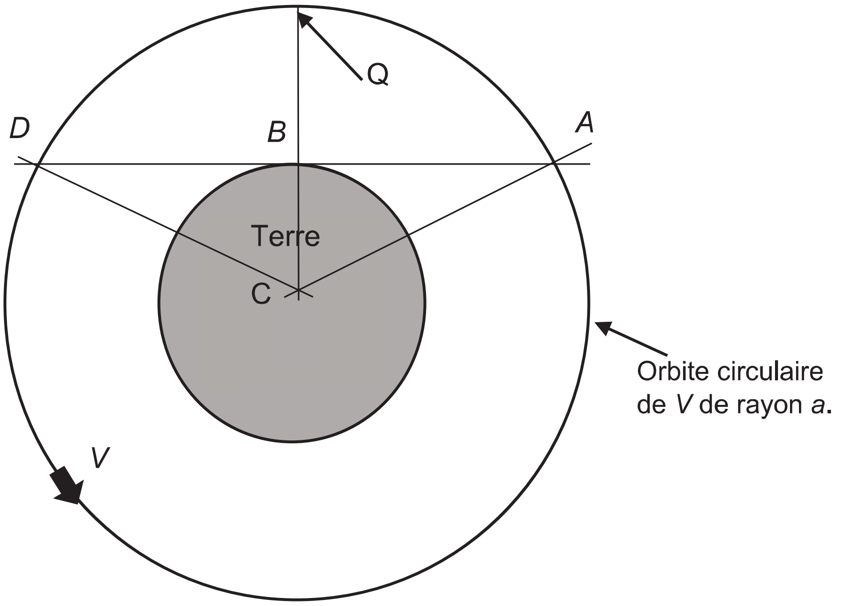
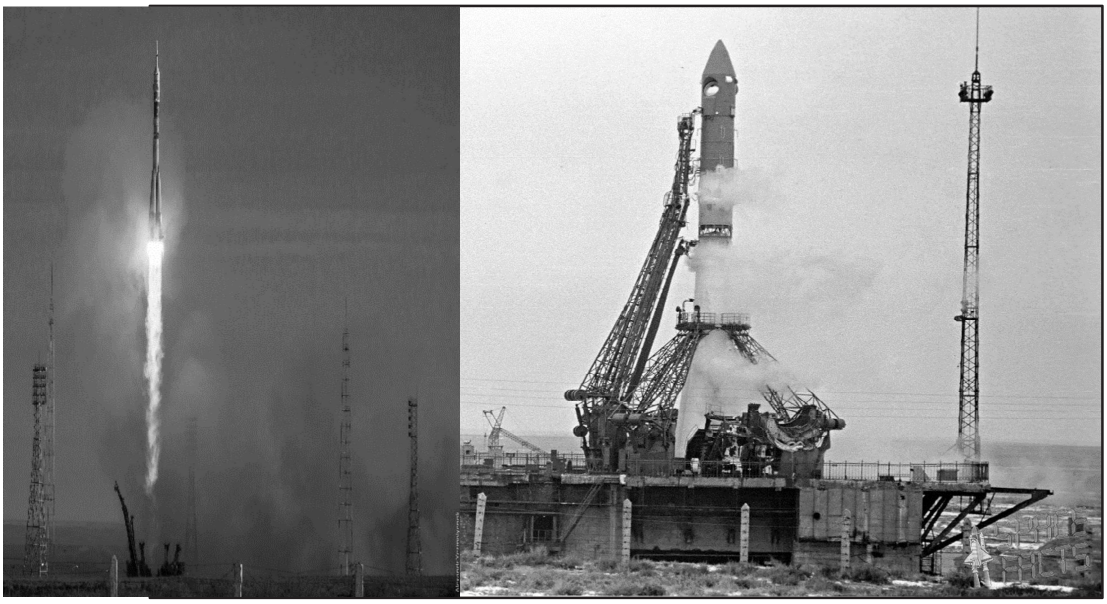


Figure 3 - Orbite du satellite

Hypothèse de travail en **Q7** : le champ de pesanteur est uniforme dans la zone où Vo se déplace et a la valeur g_0. L'instant t = 0 est l'instant de départ de la fusée.



Photographies extraites de forum-conquètespatiale.fr

Q7. Le vaisseau est lancé par une fusée (**photo ci-dessus**) qui peut, à l'aide de tuyères, éjecter des gaz avec une vitesse de $u = 3\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ (par rapport à la tuyère). La trajectoire de la fusée est supposée rectiligne verticale. Quand on écrit le principe fondamental de la dynamique au système ouvert fusée, dans le référentiel géocentrique, on obtient l'équation différentielle suivante :

$$m(t)\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -m(t)g_0 - u\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}. \qquad (1)$$

Tout se passe comme si s'exerçait à l'instant t sur le système de masse $m(t)$ en plus du poids une force de poussée égale au produit de la vitesse relative d'éjection par le débit massique des gaz éjectés. Les forces de frottement sont négligées.

a) Montrer que la fusée chargée (vaisseau, 2 passagers, combustible de masse initiale m_{comb}, carcasse, matériel…) de masse initiale $m_0 = M + m_{comb}$ ne peut décoller que si le débit massique est suffisant.

b) La masse $m(t)$ de la fusée chargée s'écrit tant qu'il y a du combustible $m(t) = M + m_{comb}(1 - \alpha t) = m_0 - m_{comb}(\alpha t)$.

Écrire les équations différentielles relatives à la vitesse pendant les deux phases du mouvement. Que vaut la vitesse v_1 à l'instant $t_1 = 1/\alpha$ de la fin de la combustion ?

On prendra $M = 30$ tonnes et $m_{comb} = 90$ tonnes et $\alpha = 5 \cdot 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$.

En intégrant l'expression (1) de $v(t)$, on peut montrer que l'altitude atteinte à l'instant t_1 vaut $h = \dfrac{u}{\alpha}\left(1 - \dfrac{M}{m_{comb}} \ln\left(\dfrac{m_0}{M}\right)\right) - \dfrac{g_0}{2\alpha^2}$. Faire l'application numérique.

c) À quel instant t_2 la vitesse devient-elle nulle ? Écrire le théorème de l'énergie cinétique entre les instants t_1 et t_2. En déduire l'altitude H maximale que la fusée peut atteindre. Discuter l'hypothèse d'uniformité du champ de pesanteur.

d) Commenter les valeurs numériques obtenues pour h et H en les comparant aux données de **Q4**. Donner l'ordre de grandeur de la durée entre le départ de la fusée et la mise sur orbite du vaisseau habité.

Sur la **figure 4**, on a les relevés des positions successives datées du vaisseau au moment de la sortie de Leonov (de 8 h 30 à 8 h 50 pour sa sortie et son séjour dans le sas de communication entre la cabine et le vide).
Sur la **figure 5**, on a les relevés des positions datées du vaisseau au cours de sa dernière orbite.

Q8. *Dans ses mémoires, Leonov dit :*
1 - qu'il a commencé sa sortie à la fin de la première orbite,
2 - que c'est après une quinzaine de tours qu'ils ont commencé les manœuvres de retour.
Pouvez-vous en utilisant vos résultats obtenus en **Q4** et **Q7d** et la **figure 4** confirmer la première proposition ?
Pouvez-vous, en utilisant les **figures 4** et **5**, confirmer la seconde proposition ?

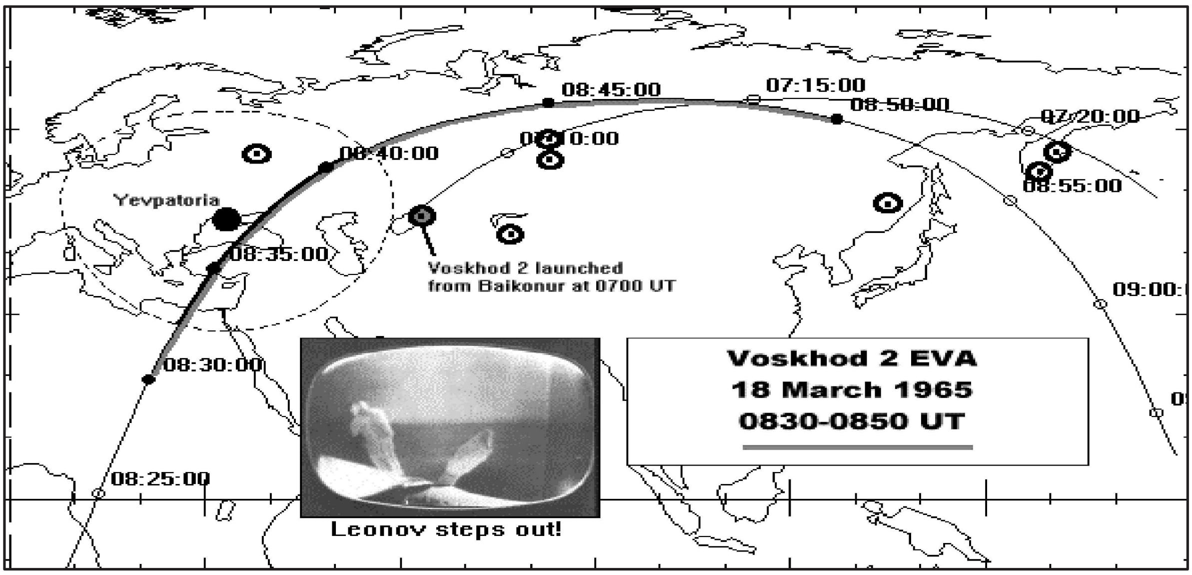


Figure extraite de Space history notes de Seven Grahn, www.ssven.grahn.pp.se

Figure 4 - Relevés des positions au cours de la sortie

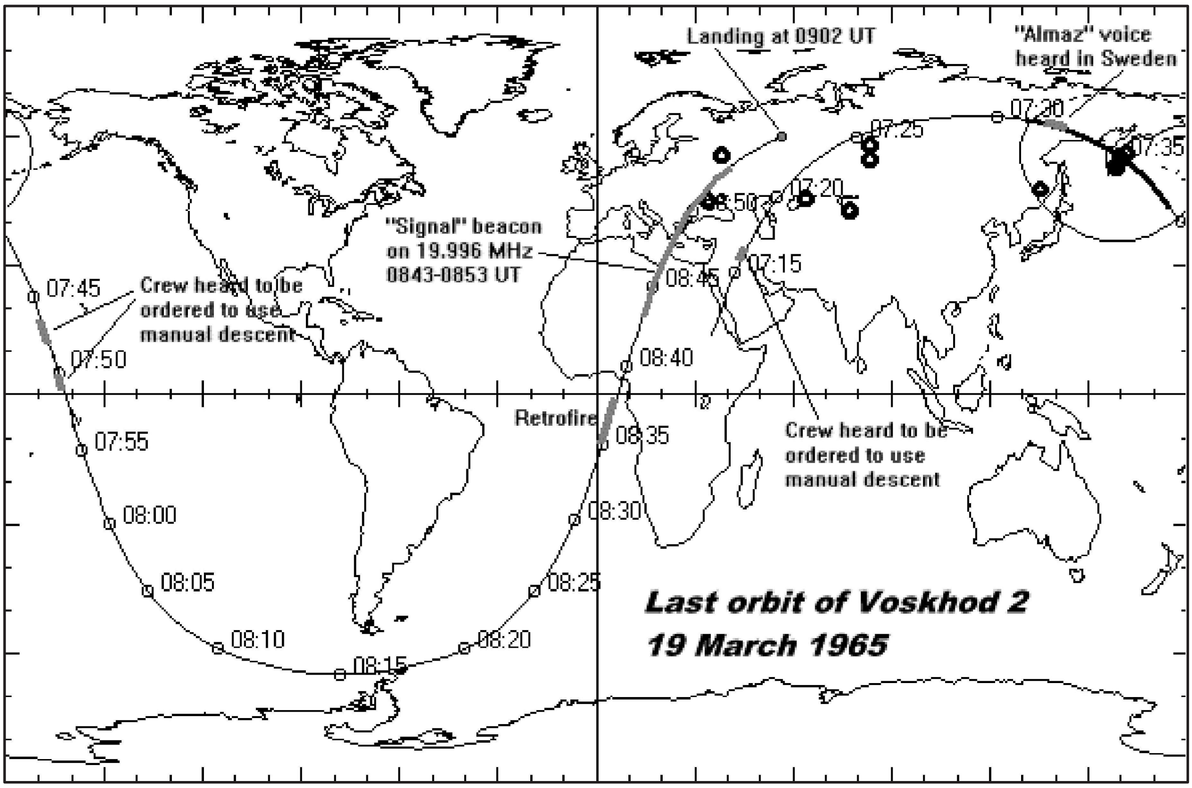


Figure extraite de Space history notes de Seven Grahn, www.ssven.grahn.pp.se

Figure 5 - Relevés des positions de la dernière orbite

Partie III - Début de la sortie

Pour permettre la sortie dans l'espace, le vaisseau est équipé d'un sas gonflable amovible fixé sur le module pressurisé. Ce sas est nécessaire car la cabine de vie des pilotes est très réduite et ne peut pas être soumise au vide (contrairement aux projets américains simultanés).

Dès la fin de la première orbite, Belaïev place la bouteille d'air sur le dos de son coéquipier, puis commande le déploiement du sas. Léonov y pénètre et sort quelques instants après la fermeture de l'écoutille intérieure. Leonov, aveuglé malgré sa visière, regarde la Terre ébloui et subjugué. Il doit immortaliser ces instants où, pour la première fois, un homme se déplace dans l'espace au-dessus de l'atmosphère. Il saisit la caméra attachée au vaisseau, lui enlève le capuchon et le jette.

On suppose le référentiel géocentrique galiléen et on travaillera dans celui-ci.

Q9. Problème. L'astronaute a communiqué au capuchon un très léger surplus de vitesse $\overline{v_0}$ orthogonale à la trajectoire du vaisseau supposée circulaire et dans le plan de celle-ci.
Sur la **figure 6** sont représentées les trajectoires du vaisseau et du capuchon dans le référentiel géocentrique. En utilisant la loi des aires, justifier que le cosmonaute pourra récupérer le capuchon.

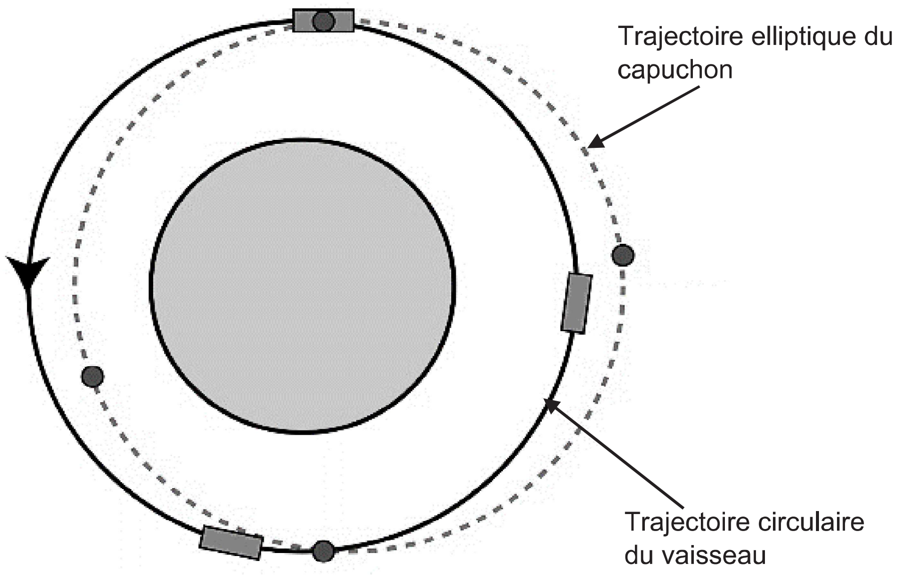


Figure 6 - Orbites du vaisseau et du capuchon

OBJECTIF LUNE

L'homme a toujours rêvé de décrocher la Lune ! La conquête de notre satellite semblait avoir fait un grand bond en avant le 20 juillet 1969 avec les premiers pas des astronautes de la mission Apollo 11. Depuis, la conquête spatiale s'est orientée pour aller plus loin, mais les espoirs de colonisation de la Lune ou de Mars sont minces. Les défis à relever apparaissent plus importants aujourd'hui. Nous allons illustrer très modestement certains points.

Données
– Constante de gravitation universelle : $\mathcal{G} = 6{,}67.\ 10^{-11}\ N.m^2.kg^{-2}$ – Masse du Soleil : $m_S = 1{,}99.10^{30}$ kg   – Masse de la Terre : $m_T = 5{,}98.10^{24}$ kg   – Masse de la Lune : $m_L = 7{,}34.10^{22}$ kg   – Distance Terre-Soleil : $D = 1{,}50.10^{11}$ m   – Distance moyenne Terre-Lune : $d = 3{,}84.10^{8}$ m   – Rayon de la Terre : $R_T = 6{,}37.10^{3}$ km   – Rayon de la Lune : $R_L = 1{,}75.10^{3}$ km   – Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3{,}00.10^{8}\ m.s^{-1}$ – Permittivité du vide : $\varepsilon_0 = 8{,}85.10^{-12}\ F.m^{-1}$ – Constante des gaz parfaits : $R = 8{,}31\ J.K^{-1}.mol^{-1}$ – Nombre d'Avogadro : $N_A = 6{,}02.10^{23}\ mol^{-1}$ – Définition du coefficient $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$: rapport des capacités thermiques isobare C_P et isochore C_V d'une même quantité de matière.   Pour un gaz parfait de quantité de matière n, on a : $C_P - C_V = nR$.

Partie I – On vise la Lune

I.1 – Symétrie sphérique et champ gravitationnel

Q1. On considère une distribution de charges, à symétrie sphérique de centre C et de rayon R, uniformément réparties avec une densité volumique uniforme ρ. Déterminer, en utilisant symétries et invariances, le champ électrique $\overrightarrow{E\,(M)}$ créé par cette distribution à l'intérieur et à l'extérieur de celle-ci. On l'exprimera en fonction de la charge totale Q de la distribution, la permittivité ε_0 du vide, les coordonnées sphériques du point M ($r = CM$, θ, φ) et les vecteurs unitaires de la base sphérique.

Q2. Écrire la force de gravitation exercée par une masse ponctuelle m placée au point P sur une masse ponctuelle de masse m' placée au point P', en notant $\mathcal{G}$ la constante d'attraction universelle. Écrire la force électrostatique exercée par une charge ponctuelle q placée au point P sur une charge ponctuelle q' placée en P'.

Q3. **a)** Énoncer le théorème de Gauss pour la gravitation en utilisant l'analogie avec le cas électrostatique. À quelle masse ponctuelle, dont on précisera la position, une distribution à symétrie sphérique de masses est-elle équivalente à l'extérieur de la distribution ?
b) Que vaut le champ de gravitation $\overrightarrow{G(C)}$ en son centre C ? Que vaut le champ de gravitation $\overrightarrow{G(M)}$ en un point M extérieur à la distribution de masse totale m en fonction de $r = CM$, $\overrightarrow{CM}$, m et $\mathcal{G}$?
c) Comparer numériquement les champs de gravitation à la surface de la Lune et à la surface de la Terre, supposées à symétrie sphérique.

I.2 – Effets de ralentissement et de modification de la distance Terre-Lune

Le Soleil, la Terre et la Lune sont tous trois supposés à symétrie sphérique. On note T le centre de la Terre, S le centre du Soleil, L le centre de la Lune et O le centre de masse du système solaire. Le vecteur $\overrightarrow{e_z}$ est le vecteur unitaire de l'axe Tz des pôles, autour duquel la terre tourne sur elle-même avec une vitesse angulaire égale à $\Omega_T = 7{,}29.10^{-5}$ rad.s^{-1}. La Lune tourne sur elle-même avec une vitesse angulaire de rotation propre $\Omega_L = 2{,}66.10^{-6}$ rad.s^{-1} autour de l'axe Lz.

Q4. Définir les référentiels : de Copernic R_O, géocentrique noté R_T et terrestre noté R_T*.

On suppose le référentiel de Copernic R_O galiléen. On lui associe le repère $(O, \overrightarrow{e_x}, \overrightarrow{e_y}, \overrightarrow{e_z})$.
De même, au référentiel géocentrique R_T, on associe $(T, \overrightarrow{e_x}, \overrightarrow{e_y}, \overrightarrow{e_z})$ et au référentiel terrestre R_T*, on associe $(T, \overrightarrow{e_X}, \overrightarrow{e_Y}, \overrightarrow{e_z})$. On définit un référentiel sélénocentrique R_L ou référentiel barycentrique de la Lune associé au repère $(L, \overrightarrow{e_x}, \overrightarrow{e_y}, \overrightarrow{e_z})$.

Q5. Justifier l'ordre de grandeur de la vitesse de rotation propre de la Terre.

Q6. À quelle condition peut-on considérer le référentiel géocentrique comme galiléen ?
À quelle condition peut-on considérer le référentiel terrestre comme galiléen ?

Q7. La Lune présente toujours la même face à la Terre. Qu'en déduisez-vous en supposant que le centre de la Lune L décrit une trajectoire circulaire à vitesse uniforme autour de T dans le référentiel géocentrique ? Évaluer en jours l'ordre de grandeur de la durée d'une révolution lunaire autour de la Terre.

Dans le référentiel géocentrique, on suppose qu'on peut écrire le principe fondamental pour un point matériel de masse μ, placé en un point M sous la forme

$$\mu\left(\frac{d^2\overrightarrow{TM}}{dt^2}\right)_{R_T} = \overrightarrow{Rext} + \mu\,\overrightarrow{G_{Terre}(M)} + \mu\,\overrightarrow{G_{Lune}(M)} + \mu\,\overrightarrow{G_{autres}(M)} - \mu\left(\frac{d^2\overrightarrow{OT}}{dt^2}\right)_{R_O},$$

en appelant $\overrightarrow{G_{Terre}(M)}$, $\overrightarrow{G_{Lune}(M)}$ et $\overrightarrow{G_{autres}(M)}$ les champs gravitationnels créés respectivement par la Terre, la Lune et les autres astres.

Q8. Interpréter chaque terme de l'égalité ci-dessus en précisant quel théorème de la mécanique est utilisé. Le référentiel géocentrique est-il supposé galiléen ?

Q9. Écrire le théorème de la résultante cinétique (ou théorème de la quantité de mouvement) appliqué à la Terre dans le référentiel de Copernic.

On néglige les effets du Soleil et des autres astres : on considère le système Terre-Lune isolé. On s'intéresse au mouvement du centre de la Lune autour de la Terre dans le référentiel géocentrique considéré galiléen dans la suite de la **partie I-2**. On assimilera la trajectoire de la Lune autour de la Terre à un cercle centré en T.

Q10. Dans cette hypothèse de trajectoire circulaire de rayon d, exprimer la vitesse V de L sur son orbite en fonction de d, $\mathcal{G}$ et m_T. Est-ce compatible numériquement avec le résultat de la question **Q7** ? Exprimer le moment cinétique $\sigma_L(T)$ par rapport au point T associé au mouvement orbital de la Lune en fonction de d, $\mathcal{G}$, m_L et m_T.

On admet que les effets d'attraction lunaire sur les océans créent des bourrelets d'eau symétriques dont la surface limite est un ellipsoïde, de centre T, tangent à la sphère terrestre. La situation est représentée **figure 1** dans le plan orthogonal à $\overrightarrow{e_z}$, donc dans le plan orthogonal à l'axe de rotation de la Lune autour de la Terre. On note θ l'angle entre le grand axe de l'ellipsoïde et la direction T L. Ces effets introduisent un couple de frottement proportionnel à la masse des océans δm et au terme $2\frac{\mathcal{G}m_L}{d^3}R_T$.

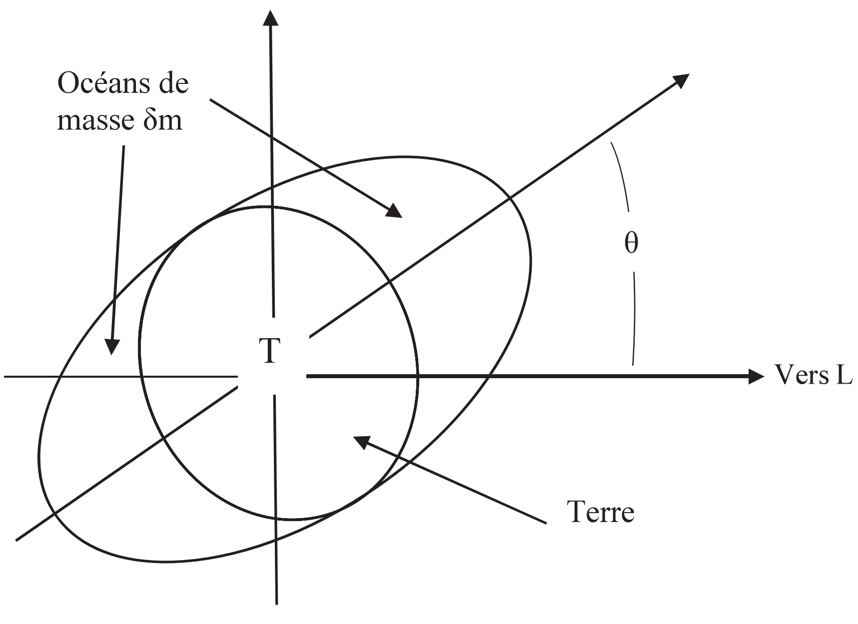


Figure 1 – Surface des océans (l'échelle n'est pas respectée par commodité de représentation)

Q11. Le couple de frottement exercé par la Lune sur la Terre est de la forme :

$$\vec{\Gamma}(T) = -\,a(\sin 2\theta)\delta m\,\frac{\mathcal{G} m_L}{d^3} R_T^2\,\vec{e_z}.$$

Quelle est la dimension de a ?

La quantité $a\delta m\,\frac{\mathcal{G} m_L}{d^3} R_T^2$ est une constante qui vaut K = $4{,}3.10^{16}$(SI). Le moment d'inertie de la Terre autour de son axe de rotation propre s'exprime par $J = \frac{2}{5} m_T R_T^2$.

Q12. Ce couple de frottement $\vec{\Gamma}(T)$ peut faire diminuer la vitesse de rotation de la Terre Ω_T. À partir d'une méthode, que l'on justifiera, exprimer en fonction de K et J, la variation de celle-ci par unité de temps $\frac{d\Omega_T}{dt}$ pour une position $\theta = 45°$. Faire l'évaluation numérique de $\frac{1}{\Omega_T}\frac{d\Omega_T}{dt}$. Commenter.

On admet que la conservation du moment cinétique du système isolé Terre-Lune permet d'affirmer que, si la vitesse de rotation de la Terre diminue, il y aura augmentation du moment cinétique orbital de la Lune, donc augmentation de la distance Terre-Lune d, le moment cinétique de rotation propre de la Lune étant négligeable devant le moment cinétique orbital. On établit ainsi que la quantité $J\Omega_T + \sigma_L(T)$ reste constante.

Q13. En déduire la variation relative $\delta d/d$ du rayon de l'orbite lunaire pour une période d'un an. Donner la valeur numérique de δd.