



**CONCOURS INTERNE POUR LE RECRUTEMENT
D'ÉLÈVES INGÉNIEURS DES TRAVAUX DE LA MÉTÉOROLOGIE**

SESSION 2019

ÉPREUVE ÉCRITE OBLIGATOIRE

PHYSIQUE

Durée : 4 heures

Coefficient : 4

La rigueur du raisonnement et la clarté de la présentation seront prises en compte dans la notation.
Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

*Cette épreuve comporte 9 pages (page de garde incluse).
La calculatrice scientifique est autorisée.*

A. Ascension d'un ballon sonde

On s'intéresse dans cette partie à l'ascension dans l'atmosphère d'un ballon sonde lancé depuis la base Dumont d'Urville en Terre-Adélie (Antarctique).



Illustration 1 : Lâcher le 23 novembre 2014 du 20 000e ballon depuis la base Dumont d'Urville depuis l'ouverture de la station en 1956. © O. Traullé, Météo-France

A.1. Équilibre de l'atmosphère

L'atmosphère est modélisée comme un gaz parfait de masse molaire $M=29,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. On se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen. L'altitude est choisie nulle au niveau de la mer, la pression y vaut $P_0=1,013\times 10^5 \text{ Pa}$, la température $T_0=263 \text{ K}$. La constante des gaz parfaits est notée $R=8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\text{mol}^{-1}$, l'accélération de pesanteur $\vec{g}=-g\vec{e}_z$ avec \vec{e}_z vecteur unitaire ascendant et $g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

A.1.1.

Rappeler la relation des gaz parfaits, et en déduire la relation des gaz parfaits en fonction de la pression P , la masse volumique ρ , la température T ainsi que M et R .

A.1.2.

On étudie une tranche d'atmosphère comprise entre les altitudes z et $z+dz$.

La représenter sur un schéma. Représenter les forces auxquelles qui s'appliquent sur elle.

A.1.3.

Écrire la relation d'équilibre de la tranche d'atmosphère.

En déduire l'équation de la statique des fluides, de la forme $\frac{dP}{dz}=f(P,T)$ avec $f(P,T)$ fonction à expliciter.

A.1.4.

On suppose l'atmosphère isotherme, avec $T = T_0 = 263 \text{ K}$.

Donner l'expression de la pression $P(z)$. Calculez les pressions P_{DU} et P_C respectivement à Dumont d'Urville ($z_{DU} = 20 \text{ m}$) et à Concordia ($z_C = 3233 \text{ m}$).

A.1.5.

On suppose à présent que la température de l'atmosphère évolue selon la relation $T(z) = T_0 - kz$ avec $k = 6,5 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$.

Donner la nouvelle expression de la pression $P(z)$. Calculez les nouvelles valeurs des pressions à Dumont d'Urville et Concordia. Commenter.

A.2. Ascension d'un ballon sonde. Suivi de sa trajectoire.

Le ballon sonde est constitué d'une enveloppe souple en latex de masse $m_{ballon} = 3,0 \text{ kg}$ supposée parfaitement étanche, remplie initialement par un volume d'hélium $V_0 = 8,3 \text{ m}^3$ de masse molaire $M_{He} = 4,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et d'une charge considérée comme ponctuelle et de masse m_{utile} . Sa vitesse ascensionnelle est considérée comme constante, de l'ordre de $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

A.2.1.

À tout instant, la pression et la température dans le ballon sont supposées identiques à celles extérieures au voisinage du ballon.

Comment appelle-t-on ces hypothèses ? Vous semblent-elles plausibles ?

A.2.2.

Le ballon vient d'être gonflé sur la base de Dumont d'Urville ($z_{DU} = 20 \text{ m}$).

Expliciter les forces qui s'exercent sur le ballon.

Quelle est la masse maximale de l'instrumentation $m_{utile\max}$ qui peut être attachée au ballon et qui permette le décollage ?

A.2.3.

On suppose que la température évolue selon la relation $T(z) = T_0 - kz$ jusqu'à la tropopause à l'altitude $z_{tropo} = 6,0 \text{ km}$ puis reste ensuite constante dans la stratosphère.

Calculer le volume du ballon à altitude $z_{100} = 100 \text{ m}$ et à z_{tropo} ; en déduire le diamètre du ballon à ces altitudes.

A.2.4.

On étudie l'ascension du ballon.

Si l'on ne considère que les forces explicitées en A.2.2., quel sera le mouvement du ballon ?

Quelle(s) autre(s) action(s) peuvent justifier le fait que le ballon monte en réalité à vitesse presque constante ?

Pour étudier cette ascension, peut-on se contenter de la mécanique du point ? En mécanique du solide ?

Selon vous, quand s'arrêtera la phase ascensionnelle du ballon ?

Le ballon étant lancé par temps clair, l'expérimentateur placé à la base Dumont d'Urville souhaite suivre son ascension à l'œil nu puis à l'aide d'une lunette astronomique.

A.2.5.

Calculer la taille angulaire, c'est-à-dire l'angle sous lequel le ballon est vu, à l'œil nu, lorsque le ballon est aux altitudes z_{100} et z_{tropo} . On donnera le résultat en radian, puis en degrés et minutes d'angle. Un schéma explicatif est bienvenu.

A.2.6.

On appelle pouvoir séparateur de l'œil, le plus petit angle sous lequel deux objets sont perçus par l'œil et distingués par celui-ci. Pour l'œil humain, le pouvoir séparateur est $\alpha = 3 \times 10^{-4} \text{ rad}$ soit une minute d'angle. Commenter les résultats de la question précédente.

L'expérimentateur souhaite utiliser une lunette, dispositif composé de deux lentilles de verre coaxiales L_1 et L_2 de distances focales respectives $f_1' = 400 \text{ mm}$ et $f_2' = 50 \text{ mm}$.

A.2.7.

Que signifie le fait que les distances focales sont positives ?

A.2.8.

On considère un objet étendu AB à l'infini. On note A_1B_1 son image par la lentille L_1 .
Où se situe l'image A_1B_1 ?

A.2.9.

On note $A'B'$ l'image de A_1B_1 par la lentille L_2 .
Comment associer ces deux lentilles de façon à former un dispositif afocal, c'est-à-dire qui réalise l'objet AB à l'infini, une image finale $A'B'$ également à l'infini ?
Réaliser un schéma de ce dispositif.

A.2.10.

Calculer le grossissement angulaire $G = \frac{\theta'}{\theta}$ avec θ et θ' tailles angulaires de l'objet AB et de l'image finale $A'B'$. Commenter en particulier le signe du grossissement angulaire G .

A.2.11.

On dispose à présent d'une lentille L_3 de distance focale $f_3' = -50 \text{ mm}$.
Comment associer les lentilles L_1 et L_3 pour former un dispositif afocal ?
Réaliser un schéma.
Calculer le grossissement angulaire de ce nouveau dispositif. Commenter.

A.2.12.

Que proposer pour obtenir un grossissement encore plus important ?
Quelles problématiques peuvent apparaître ? Comment y remédier ?

A.3. Transmission des données vers le sol

La mesure des paramètres températures, humidité et pression, ainsi que la géolocalisation par GPS sont transmises au sol par voie hertzienne, c'est-à-dire sous forme d'ondes électromagnétiques, dans la bande 400-406 MHz.

A.3.1.

De quoi est composée l'onde électromagnétique ? Quelle est sa vitesse de propagation dans le vide ? Dans l'air ? Calculer la longueur d'onde pour une onde à 403 MHz.

On suppose que l'onde émise par la radiosonde ponctuelle en A est sphérique et isotrope. Le champ électrique et le champ magnétique émis par la radiosonde ont alors pour expression, en un point M repéré coordonnées sphériques, avec $\vec{r} = \overrightarrow{AM}$:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 \frac{a}{r} e^{-i(\omega t - kr)} \vec{e}_1 \quad \text{et} \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = B_0 \frac{a}{r} e^{-i(\omega t - kr)} \vec{e}_2$$

avec a , E_0 et B_0 des constantes, \vec{e}_1 et \vec{e}_2 sont des vecteurs unitaires.

On note $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ perméabilité magnétique du vide et c la vitesse de la lumière.

A.3.2.

Représenter sur un schéma les champs \vec{E} et \vec{B} . Dans quelle direction se propagent ces champs ? Que peut-on dire de l'orientation des vecteurs \vec{e}_1 et \vec{e}_2 ?

A.3.3.

On rappelle l'expression du vecteur de Poynting $\vec{\Pi} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \wedge \vec{B}$. Que désigne ce vecteur ? Calculer son expression.

A.3.4.

Calculer le flux de ce vecteur de Poynting au travers de la sphère de centre A et de rayon r quelconque. Commenter.

A.3.5.

On suppose que la source ponctuelle en A émet avec une puissance $P_e = 1,0 \text{ W}$

Calculer la puissance reçue P_r par le dispositif de réception au sol de Dumont d'Urville, dont la surface est $S = 1,0 \text{ m}^2$, lorsque la sonde est aux altitudes z_{100} puis z_{tropo} . Commenter.

B. Observation de l'atmosphère par satellite

Les satellites géostationnaires tournent autour de la Terre sur une orbite située dans le plan de l'équateur, à une altitude proche de 36 000 km. Ils évoluent à la même vitesse angulaire que la Terre autour de l'axe des pôles. Ainsi, ils surplombent toujours la même partie du globe terrestre. Leur altitude élevée et leur position fixe par rapport à la Terre leur permettent de délivrer des images couvrant une grande surface, et ce à un rythme soutenu. Une caractéristique parfaite pour suivre l'évolution des nuages.

Le satellite géostationnaire constitue pour les météorologistes un outil irremplaçable de surveillance et de prévision immédiate du temps. Toutes les 15 minutes (voire toutes les 5 minutes), il localise les principales masses nuageuses (perturbations aux latitudes tempérées, systèmes orageux, cyclones tropicaux...) et identifie les types de nuages présents. Comme le satellite géostationnaire surveille toujours la même partie du globe terrestre, on peut « animer » une séquence d'images pour avoir une idée très précise de l'évolution et du déplacement des masses nuageuses. Les données de ce satellite sont également essentielles pour le suivi des phénomènes cycloniques.

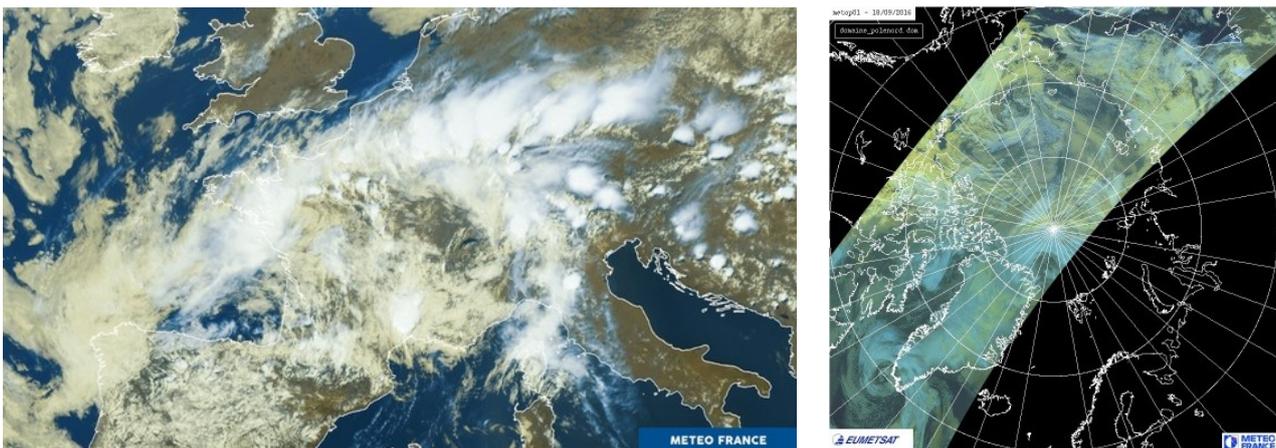


Illustration 2 : à gauche, image METEOSAT-11, le 11/06/2018 à 13h00 UTC : De l'air froid en altitude sur l'ouest de la France maintient un temps très agité sur le pays. Une dépression située sur le centre ouest accentue l'instabilité de la masse d'air, principalement des Pays de la Loire aux frontières du nord-est. De violentes intempéries ont lieu, avec d'importants cumuls de pluie et de multiples orages. Les orages sévissent également de l'Allemagne à l'Italie. À droite, image du satellite défilant METOP le 18 septembre 2016. À chaque passage, METOP « voit » une bande terrestre, ici image en composition colorée le 18 septembre 2016. © Météo-France/EUMETSAT

Les satellites défilants utilisés en météorologie tournent autour de la Terre sur une orbite quasi circulaire passant près des pôles, à une altitude d'environ 850 km. Ils font le tour du globe en près de deux heures. La plupart ont une orbite « héliosynchrone », ce qui signifie que le plan de l'orbite suit le déplacement apparent du Soleil autour de la Terre. Ainsi, les points de la Terre situés sur un même parallèle sont tous survolés à la même heure solaire.

Comme les satellites géostationnaires, les satellites défilants sont munis d'un imageur à plusieurs canaux qui observe la surface de la Terre. L'image d'une partie du globe terrestre est obtenue en exploitant la progression du satellite sur son orbite et le balayage de l'imageur dans la direction perpendiculaire à sa trajectoire. L'imageur permet de surveiller les masses nuageuses sur l'ensemble de la Terre et notamment dans les régions polaires (la Scandinavie, par exemple) qui échappent à la vue des satellites géostationnaires. En revanche, comme les satellites défilants ne survolent une région de moyenne latitude que deux fois par jour, on ne peut pas « animer » leurs images pour suivre le mouvement des masses nuageuses.

B.1. Orbite de satellites géostationnaire et défilant

B.1.1.

Rappeler l'expression de la force gravitationnelle exercée par la Terre T de masse M_T sur un satellite S de masse m . On notera G la constante universelle de gravitation et $\vec{r} = \vec{TS}$. Représenter cette force sur un schéma.

B.1.2.

Retrouver l'expression de l'énergie potentielle de gravitation $E_p = -\frac{K}{r}$ avec K constante à expliciter.

B.1.3.

Qu'appelle-t-on référentiel galiléen ? Quel est le référentiel galiléen de référence dans le système solaire ?

Quel référentiel choisit-on pour étudier le mouvement d'un satellite autour de la Terre ? À quelle(s) condition(s) peut-on le considérer galiléen ?

B.1.4.

On rappelle que l'énergie mécanique du satellite s'écrit $E_m = -\frac{K}{2a}$ avec a demi-grand-axe de la trajectoire elliptique.

Quelle hypothèse a été formulée pour justifier que l'énergie mécanique est constante ? Dans quels cas cette hypothèse vous paraît-elle légitime ?

On suppose dans la suite que la trajectoire du satellite est circulaire, de rayon $r = R_T + h$ avec $R_T = 6370 \text{ km}$ rayon terrestre et h altitude.

B.1.5.

En déduire une expression de la norme $v = \|\vec{v}\|$ de la vitesse en fonction de G, h, m, M_T et R_T puis la période de révolution T_{rev} en fonction des mêmes paramètres. Commenter.

B.1.6.

Calculer l'altitude $h_{géo}$ d'un satellite géostationnaire. Calculer la période T_{METOP} du satellite météorologique héliosynchrone METOP-A dont l'altitude est $h_{METOP} = 850 \text{ km}$

B.1.7.

Le satellite METOP, d'altitude basse, est freiné par la haute atmosphère peu dense, qui lui oppose une faible force de frottement $\vec{f} = -\alpha m v \vec{v}$. la trajectoire reste quasi-circulaire ; l'altitude diminue de $\epsilon = 1,0 \text{ m}$ sur un tour. Effectuer un bilan d'énergie sur un tour. En déduire l'expression littérale puis la valeur numérique du coefficient α . Quelle est la perte d'altitude au bout d'un an ?

B.2. Contraintes thermiques sur le satellite

L'objet de l'étude dans cette partie est le panneau solaire du satellite météorologique METOP-A. Le panneau solaire est constitué d'une structure en aluminium en nid d'abeille pour lui conférer rigidité et légèreté, sur lequel est déposée une très fine couche de semi-conducteur photovoltaïque.

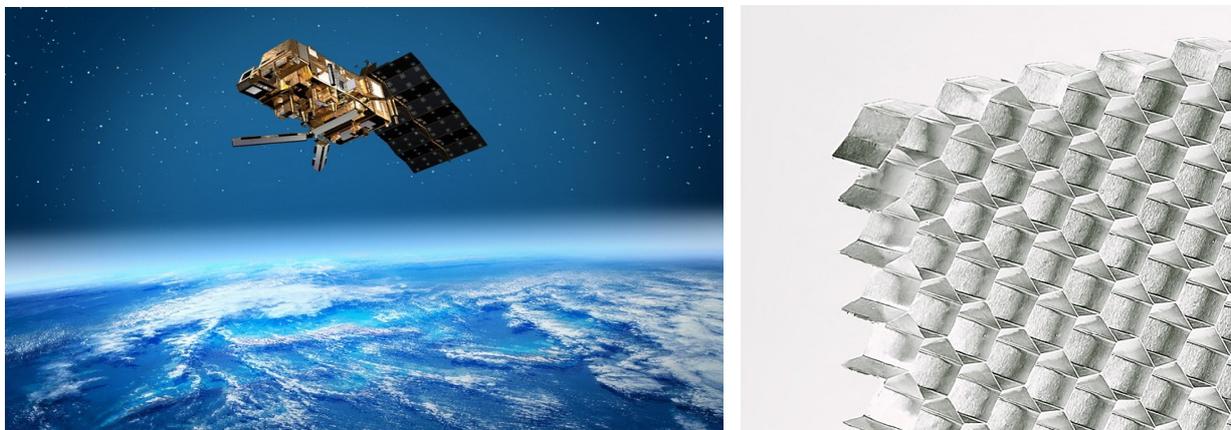
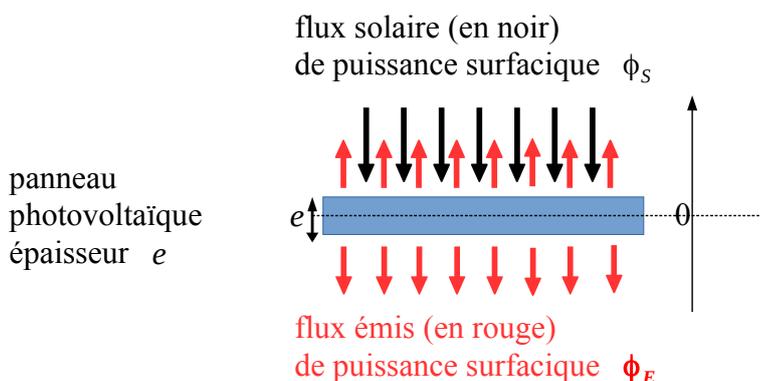


Illustration 3 : Satellite défilant héliosynchrone METOP-A (gauche) et structure « NIDA » en nid d'abeille en aluminium assurant la rigidité du anneau solaire.

Le panneau solaire est modélisé par un parallélépipède de surface $S=2,0\text{m}^2$ et d'épaisseur $e=2,0\text{cm}$ dont la capacité thermique massique est $c=900\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ et la masse volumique $\mu=50\text{kg.m}^{-3}$. Ce panneau est éclairé (d'un côté) par le rayonnement solaire d'incidence normale quand il est face au soleil. Il reçoit également le flux émis par la Terre et le flux solaire réfléchi par la Terre. Ces deux derniers flux sont négligés dans cette étude. Il émet un flux

Le panneau se comporte comme un corps noir : toute la puissance surfacique $\phi_S=1,36\text{kW.m}^{-2}$ du flux solaire est absorbée par le panneau photovoltaïque. Il émet également une puissance surfacique dû à son rayonnement de corps noir, selon la loi de Stefan-Boltzmann $\phi_E=\epsilon\sigma T^4$ avec T température du panneau en Kelvin, avec $\sigma=5,67\times 10^{-8}\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$ constante de Stefan-Boltzmann et $\epsilon=1$ émissivité, coefficient sans unité égal à 1 pour le corps noir (compris entre 0 et 1 de façon générale). Cette puissance émise est émise des deux côtés du panneau solaire.



B.2.1.

Vérifier que l'expression de ϕ_E donne bien une puissance surfacique.

B.2.2.

Écrire le premier principe de la thermodynamique pour le panneau entre les instants t et $t+dt$.
Montrer que l'on obtient une équation différentielle du premier ordre de la forme $\frac{dT}{dt} + \beta T^4 = \gamma$
avec β et γ à expliciter en fonction des données du problème.

B.2.3.

Que devient cette équation lorsque le satellite entre dans la zone d'ombre de la Terre ?

B.2.4.

Le satellite reste dans la zone d'ombre pendant une durée $\Delta t = 40 \text{ min}$. Sachant que la température du panneau à l'entrée de la zone d'ombre est de $T_0 = 64^\circ\text{C}$ calculer sa température à la sortie de la zone d'ombre.

B.2.5.

On appelle coefficient de dilatation le coefficient $\alpha_1 = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} = 23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ avec L_0 longueur du panneau photovoltaïque à la température T_0 , ΔL variation de longueur et ΔT variation de température.

Pour $L_0 = 2,00 \text{ m}$ calculer la variation de longueur ΔL du panneau photovoltaïque. Commenter.

B.2.6.

Pourquoi le corps du satellite est-il revêtu de feuillets d'or ?

B.2.7.

Selon vous, quel est l'influence des flux émis par la Terre et du flux solaire réfléchi par la Terre pour le panneau photovoltaïque ?

Pour augmenter la longévité du satellite, on souhaite diminuer les variations de température du panneau photovoltaïque. Quelle(s) solution(s) technologique(s) simple(s) proposez-vous ?

FIN DE L'ÉNONCÉ