

# ROYAUME DU MAROC

Ministère de l'Éducation Nationale  
Enseignement Secondaire et Technique

Ministère de l'Enseignement  
Supérieur, de la Formation des Cadres  
et de la Recherche Scientifique

## Concours National Commun d'Admission aux Grandes Écoles d'Ingénieurs Session 2004

### ÉPREUVE DE PHYSIQUE II

Durée 4 heures

Concours **MP**

Cette épreuve comporte 7 pages au format A4, en plus de cette page de garde  
L'usage de la calculatrice est *autorisé*

## Sondage atmosphérique

L'épreuve aborde quelques aspects de la physique de l'atmosphère terrestre. Elle est constituée de 2 parties largement indépendantes entre elles. Dans toute la suite on négligera les différents mouvements de la Terre de manière à pouvoir assimiler le référentiel terrestre  $R_T$  à un référentiel galiléen.

$R(O, x, y, z)$  désigne un repère cartésien lié à  $R_T$ ; l'axe Oz est pris vertical ascendant.

L'intensité  $\vec{g}$  du champ de pesanteur sera supposée constante. Tous les gaz rencontrés dans cette étude seront considérés comme parfaits.

### Données utiles

- . Constante des gaz parfaits :  $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- . Intensité du champ de pesanteur terrestre :  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
- . Pression atmosphérique à l'altitude  $z = 0 \text{ km}$  :  $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- . Température ambiante à l'altitude  $z = 0 \text{ km}$  :  $T_0 = 290 \text{ K}$
- . Masse molaire de l'air :  $M_a = 29,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$
- . Masse molaire de l'hélium :  $M_{He} = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$
- . Rapport des capacités calorifiques de l'air :  $\gamma = c_p/c_v = 7/5$
- . Rapport des capacités calorifiques de l'hélium :  $\gamma = c_p/c_v = 5/3$

### 1<sup>ère</sup> partie :

### Thermodynamique de l'atmosphère

Tout au long de cette partie, on considérera que l'air atmosphérique est en équilibre hydrostatique sous la seule influence du champ de pesanteur. D'autre part on négligera la rotondité de la Terre de sorte que les variables d'état ne dépendent que de l'altitude  $z$ .

#### 1.1 Étude préliminaire

##### 1.1.1 Equilibre hydrostatique

1.1.1.1 Montrer que la pression  $p_a(z)$  de l'air à l'altitude  $z$  est reliée à l'intensité  $\vec{g}$  du champ de pesanteur et à la masse volumique  $\mu_a(z)$  de l'air par la relation :

$$\frac{dp_a(z)}{dz} = -g\mu_a(z) \quad (1)$$

Pour cela on pourra considérer une tranche d'atmosphère comprise entre les altitudes  $z$  et  $z + dz$  et exprimer la condition de son équilibre mécanique après avoir dressé un bilan des forces auxquelles elle est soumise.

1.1.1.2 Exprimer la masse volumique  $\mu_a(z)$  de l'air en fonction de sa température  $T_a$  et de sa pression  $p_a$ . Calculer numériquement la masse volumique de l'air à l'altitude  $z = 0 \text{ km}$  notée  $\mu_0$ .

1.1.1.3 Dédire de ce qui précède l'équation différentielle liant la pression  $p_a$  à l'altitude  $z$  pour un profil de température  $T_a(z)$  donné.

##### 1.1.2 Application : Modèle de l'atmosphère isotherme

Dans cette question on suppose que la température de l'atmosphère est uniforme et partout égale à  $T_a$ .

**1.1.2.1** Montrer que la pression  $p_a(z)$  est alors donnée par :

$$p_a(z) = p_0 \exp -\frac{z}{H_a} \quad (2)$$

et donner l'expression de la constante  $H_a$ .

**1.1.2.2** Pourquoi la constante  $H_a$  est-elle appelée échelle de hauteur ? En donner une interprétation graphique. Calculer numériquement  $H_a$ . Commenter le résultat obtenu en calculant la distance  $\Delta z_1$  nécessaire pour que  $p_a$  varie de 1%.

**1.1.2.3** Établir dans ces conditions l'expression de  $\mu_a(z)$  en fonction de  $\mu_0$  et  $z$ .

### 1.1.3 Poussée d'Archimède

Considérons un volume  $V$ , limité par une surface fermée  $\Sigma$  au sein de l'atmosphère au repos dans le champ de pesanteur  $\vec{g}$ .

Montrer que le système contenu à l'intérieur de la surface  $\Sigma$  est soumis de la part du reste de l'atmosphère à une force pressante totale, appelée aussi force de poussée  $\vec{\Pi}_A$  ou poussée d'ARCHIMÈDE, donnée par :

$$\vec{\Pi}_A = -m_d \vec{g} \quad (3)$$

où  $m_d = \int \int \int \mu d\tau$  est la masse d'air déplacé c'est-à-dire la masse qu'aurait le volume  $V$  s'il était occupé par l'air atmosphérique dans les conditions d'équilibre de l'atmosphère.

On rappelle que les forces de pression peuvent être décrites par une densité volumique d'effort donnée, en un point  $M$  où la pression est  $p_a(M)$ , par  $\vec{f}_p(M) = -\vec{\nabla} p_a(M)$ . D'autre part, la condition d'équilibre hydrostatique peut être généralisée par  $\vec{\nabla} p_a = \mu_a \vec{g}$ .

## 1.2 Sondage de l'atmosphère

Un ballon-sonde est constitué par une enveloppe fermée (ballon) à laquelle est accrochée une nacelle contenant des instruments de mesure : sondes de température, de pression, d'humidité, d'hygrométrie, ... ainsi que ceux nécessaires à la transmission radio des données. L'enveloppe, la nacelle et les instruments qu'elle contient ont une masse totale  $m = 20 \text{ kg}$ . Initialement ( $z = 0 \text{ km}$ ) l'enveloppe est partiellement gonflée à l'aide d'une quantité de matière  $n$  d'hélium. Au besoin, on pourra négliger la variation de la pression d'un point à un autre du ballon-sonde. D'autre part, on négligera le volume de la nacelle devant celui du ballon.

Le diamètre du ballon ne peut dépasser une valeur critique  $\phi_c = 8 \text{ m}$ . Au-delà de  $\phi_c = 8 \text{ m}$  le ballon éclate. On négligera la raideur de l'enveloppe.

**1.2.1** Calculer numériquement la valeur du volume maximum  $V_c$  du ballon.

**1.2.2** Exprimer la résultante  $\vec{F}$  des forces qui s'exercent sur le ballon-sonde à une altitude  $z$  quelconque dans l'hypothèse de l'atmosphère isotherme et de l'équilibre hydrostatique. On exprimera le résultat en fonction de  $m$ ,  $n$ ,  $M_{He}$ ,  $M_a$  et  $g$ .

**1.2.3** Montrer qu'il existe une valeur minimale  $n_{min}$  de la quantité de matière  $n$  d'hélium qui sert à gonfler le ballon au-delà de laquelle le ballon peut décoller. En déduire le volume minimum  $V_{min}$  qui permet le décollage. Calculer numériquement  $n_{min}$  et  $V_{min}$ .

**1.2.4** Le ballon est gonflé avec une masse  $m_{He} = 9 \text{ kg}$  d'hélium.

**1.2.4.1** Cela lui permet-il de décoller ?

**1.2.4.2** Justifier brièvement pourquoi on peut considérer que lors de l'ascension du ballon, l'hélium subit une détente adiabatique. Par la suite on supposera que cette détente est quasi-statique.

**1.2.4.3** Calculer la valeur numérique du volume initial  $V_0$  du ballon.

- 1.2.4.4 Déterminer l'expression littérale et en déduire la valeur numérique la hauteur maximale  $z_m$  accessible par le ballon dans le cadre du modèle de l'atmosphère isotherme de température  $T_0$  (cf. 1.1.2). Que se passe-t-il lorsque  $z$  atteint  $z_m$  ?
- 1.2.5 Lors de l'ascension du ballon, un système de transmission hertzienne permet de récupérer au sol les données enregistrées. La figure 1 donne le profil de variation verticale de la température relevé par le ballon-sonde dans la troposphère ( $0\text{km} \leq z \leq 11\text{km}$ ). L'hypothèse d'une atmosphère isotherme est-elle vérifiée dans les premières couches de l'atmosphère ? Expliquer brièvement pourquoi l'air au sol est plus chaud qu'en altitude.
- 1.2.6 Dans la troposphère règne un gradient de température  $dT_a/dz = -\Gamma$  constant en première approximation.
- 1.2.6.1 Déterminer graphiquement le gradient thermique  $\Gamma$  qui règne dans la troposphère.
- 1.2.6.2 Déterminer les expressions donnant l'évolution de la pression  $p_a(z)$  et de la masse volumique  $\mu_a(z)$  de l'air dans la troposphère.
- 1.2.6.3 Représenter graphiquement  $p_a(z)$  et  $\mu_a(z)$  en fonction de  $z$  et commenter en comparant avec le modèle de l'atmosphère isotherme.

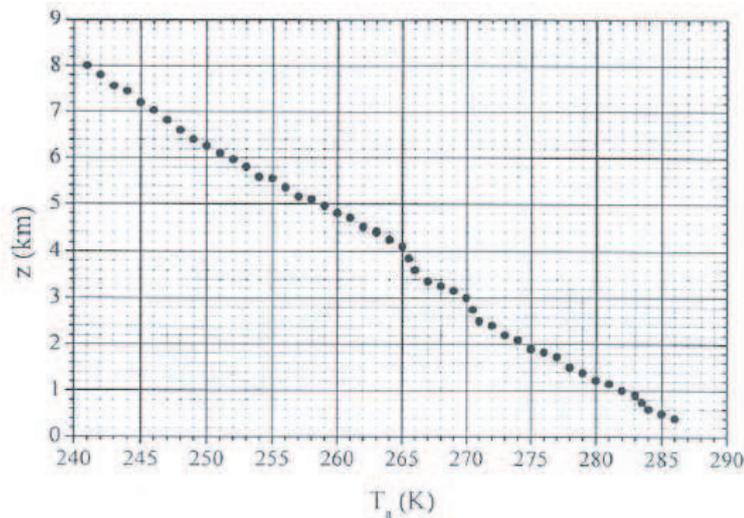


Fig 1 : Profil vertical de température mesuré par le ballon-sonde.

### 1.3 Stabilité de l'atmosphère

On se propose d'étudier la stabilité de la troposphère terrestre dans le cadre du modèle "à gradient de température"  $dT_a/dz = -\Gamma$  constant. Pour cela, on considère un système mésoscopique constitué d'un petit volume d'air  $V$  pouvant être considéré comme infinitésimal à l'échelle macroscopique mais contenant un très grand nombre de particules d'air.  $V$  sera considéré comme un système fermé. Le système initialement en équilibre thermodynamique à l'altitude  $z_i$  est élevé d'une hauteur  $dz$ . On suppose que lors de ce déplacement le système n'échange pas de chaleur avec l'air environnant. La transformation sera de plus supposée quasi-statique.

- 1.3.1 Quelle relation thermodynamique relie la température  $T$  et la pression  $p$  de l'air constituant le système au cours d'une telle transformation ?
- 1.3.2 En différentiant la relation précédente, montrer que la variation de température  $dT$  du système entre les altitudes  $z_i$  et  $z_i + dz$  est telle que :

$$\frac{dT}{dz} = -\Gamma_s$$

où  $\Gamma_s$  est une constante positive que l'on exprimera en fonction du rapport, des capacités calorifiques de l'air, de la masse molaire  $M_a$  de l'air, de la constante  $R$  des gaz parfaits et de l'intensité  $g$  du champ de pesanteur. Calculer numériquement  $\Gamma_s$ .

- 1.3.3 Exprimer la résultante  $\vec{F}$  des forces à laquelle est soumis le système ainsi déplacé à l'altitude  $z_i + dz$  en fonction de sa masse volumique  $\mu$  à l'altitude  $z_i + dz$ , de la masse volumique  $\mu_a$  de l'air environnant, du volume  $V$  et de l'intensité  $g$  du champ de pesanteur.
- 1.3.4 En déduire la force par unité de masse  $\vec{f}$  à laquelle est soumis le système à l'altitude  $z_i + dz$  en fonction de la température  $T$  du système, de la température  $T_a$  de l'air environnant et de l'intensité du champ de pesanteur  $g$ .
- 1.3.5 Déduire de ce qui précède un critère de stabilité de l'air déplacé. Quelle est la valeur maximale de  $\Gamma$  permettant d'avoir de l'air stable ?
- 1.3.6 Établir l'équation du mouvement libre du système considéré.
- 1.3.7 En linéarisant l'équation du mouvement du système, déterminer la pulsation  $\omega$  de son mouvement en fonction de  $\Gamma$ ,  $\Gamma_s$ ,  $g$  et  $T_i = T(z_i)$ . Application numérique : calculer  $\omega$  et la période correspondante pour  $z_i = 3 \text{ km}$ .

## 2<sup>ème</sup> partie :

### Mouvement d'un ballon-sonde

Dans cette partie, on se propose d'étudier quelques mouvements d'un ballon-sonde dans le cadre d'un modèle simplifié. Pour cela on considère le système (S) constitué d'un ballon-sonde de masse  $m_1 = 10 \text{ kg}$  -y compris la masse du gaz ayant servi à gonfler le ballon- auquel est suspendu une nacelle de masse  $m_2 = 20 \text{ kg}$  -y compris la masse des instruments de mesure et de transmission-

On note  $M = m_1 + m_2$  la masse totale du système (S). Le ballon est supposé sphérique de centre  $B$  et de diamètre constant  $\phi = 4 \text{ m}$ . La nacelle est quant à elle supposée ponctuelle et centrée au point  $C$  (figure 2) tel que  $BC = 3 \text{ m}$ . On posera par la suite  $\ell_1 = BG$  et  $\ell_2 = GC$ .

La liaison entre le ballon et la nacelle est supposée rigide et sans masse. On supposera alors que le système (S) se comporte comme un solide indéformable de moment d'inertie  $J$  par rapport à l'axe  $(G, \vec{u}_x)$  perpendiculaire à  $BC$  et passant par le centre d'inertie  $G$  de (S). Pour les applications numériques on prendra  $J = 77 \text{ kg.m}^2$ .

En fin, on supposera que la masse volumique de l'air est constante et vaut  $\mu_a = 1,3 \text{ kg.m}^{-3}$ . L'atmosphère environnante du ballon-sonde est le siège d'un vent caractérisé par sa vitesse  $\vec{V} = V\vec{u}_y$  uniforme et constante.

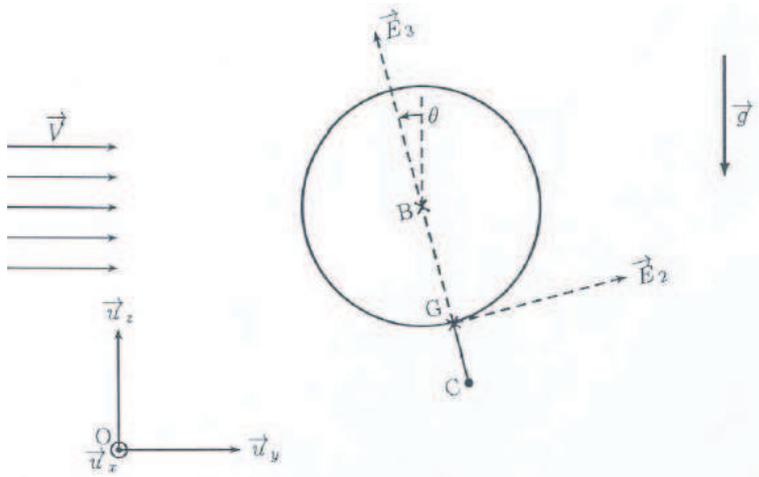


Fig 2 : Ballon-sonde en mouvement dans le champ de pesanteur.

On restreint l'étude au mouvement du système (S) dans le plan vertical constant ( $yOz$ ). Le système est repéré par les coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  de son centre d'inertie  $G$  et par l'angle  $\theta = (\vec{u}_z, \vec{E}_3)$ .

Toutes les grandeurs vectorielles demandées seront exprimées dans la base  $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$  du repère  $R(O, x, y, z)$  lié au référentiel terrestre  $R_T$  supposé galiléen.

## 2.1 Grandeurs cinématiques

2.1.1 Déterminer, littéralement puis calculer numériquement, la position du centre d'inertie  $G$  de (S).

2.1.2 Exprimer le vecteur rotation instantané  $\vec{\Omega}$  de (S) relativement à  $R_T$ .

2.1.3 Exprimer la vitesse  $\vec{v}(B)$  du centre  $B$  du ballon-sonde par rapport à  $R_T$ , en fonction de  $y$ ,  $z$  et  $\theta$  et leurs dérivées ainsi que de  $\ell_1$ .

2.1.4 Déterminer les composantes  $U_x$ ,  $U_y$  et  $U_z$  de la vitesse relative  $\vec{U}$  du centre  $B$  du ballon sonde par rapport à l'atmosphère environnante.

## 2.2 Bilan de forces

En plus de son poids  $\vec{P}$ , le système (S) est soumis à l'action des forces pressantes de l'atmosphère qui peut être décomposée en :

- la poussée d'ARCHIMÈDE  $\vec{\Pi}_A$  (cf. 1.1.3) dont on suppose qu'elle reste applicable en régime dynamique ;
- la force de résistance de l'air donnée par :

$$\vec{R}_a = -\frac{1}{8}C_x\pi\phi^2\mu_a U\vec{U}$$

où  $C_x = 0,8u.S.I$  est un coefficient positif constant appelé coefficient de traînée et  $U = \|\vec{U}\|$  le module de la vitesse relative du système (S) par rapport à l'air ambiant. On posera par la suite :  $k = \frac{1}{8}C_x\pi\phi^2\mu_a$ .

Dans le cadre du modèle simplifié adopté, on supposera que ces deux forces n'agissent pas sur la nacelle et que leur point d'application est le centre  $B$  du ballon.

2.2.1 Quelle est la dimension de  $C_x$  ? Calculer numériquement  $k$ .

2.2.2 Donner l'expression de la poussée d'ARCHIMÈDE  $\vec{\Pi}_A$  agissant sur le ballon-sonde et calculer numériquement son module que l'on notera  $\Pi_A$  par la suite.

2.2.3 Déterminer les composantes  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$  de la résultante  $\vec{F}$  des efforts qui s'exercent sur le système (S).

2.2.4 Déterminer de même, les composantes  $M_x$ ,  $M_y$  et  $M_z$  du moment résultant  $\vec{M}$  en  $G$  des efforts qui s'exercent sur le système (S).

## 2.3 Equations dynamiques du mouvement

Écrire, en projection sur  $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$ , le théorème de la résultante cinétique et le théorème du moment cinétique appliqués au système (S) relativement au référentiel terrestre  $R_T$ .

## 2.4 Régime établi

On se propose d'étudier un régime particulier du mouvement du ballon-sonde pour lequel le centre de gravité  $G$  se déplace à vitesse constante et l'angle  $\theta$  reste constant. Ce régime sera appelé **régime établi** dans la suite du problème.

2.4.1 Préciser la direction de la vitesse  $\vec{U}_0$  de (S) par rapport au vent dans ce régime et exprimer son module  $U_0 = \|\vec{U}_0\|$  en fonction de  $k$ ,  $M$ ,  $g$  et  $\Pi_A$ . Calculer numériquement  $U_0$ .

2.4.2 Quelle est la valeur de l'angle  $\theta$  en régime établi ?

## 2.5 Perturbation verticale du régime établi

Le système (S) étant en régime établi d'ascension à la vitesse  $\vec{U}_0$  constante, à l'instant pris comme origine, il rencontre une perturbation qui modifie instantanément sa vitesse verticale  $\dot{z}$  de  $\varepsilon_z(0)$ . On se propose alors d'étudier l'influence de cette perturbation, supposée petite, sur le mouvement d'ascension du ballon-sonde. Pour cela on pose à un instant  $t \geq 0$  :

$$\dot{z}(t) = U_0 + \varepsilon_z(t) \quad (6)$$

et on considère  $\varepsilon_z(t)$  comme petit. La perturbation étudiée ne modifie ni  $\dot{y}$  ni  $\theta$ .

**2.5.1** Écrire l'équation différentielle dont  $\varepsilon_z(t)$  est solution.

**2.5.2** En linéarisant l'équation différentielle ainsi obtenue, montrer que celle-ci peut se mettre sous la forme :

$$\frac{d\varepsilon_z}{dt} + \frac{2\alpha_1}{M}\varepsilon_z = 0$$

et donner l'expression de  $\alpha_1$  en fonction de  $k$  et  $U_0$ . Calculer numériquement  $\alpha_1$ .

**2.5.3** Donner l'expression de  $\varepsilon_z(t)$  et commenter le résultat obtenu en discutant la stabilité du régime établi.

**2.5.4** Donner l'expression d'un temps caractéristique  $\tau$  de l'évolution du régime établi et calculer sa valeur numérique. Commenter.

## 2.6 Perturbation horizontale du régime établi

Le système (S) étant en régime établi d'ascension à la vitesse  $\vec{U}_0$  constante, à l'instant pris comme origine, il rencontre une perturbation qui modifie instantanément sa vitesse horizontale  $\dot{y}$  de  $\varepsilon_y(0)$  et l'angle  $\theta$  de  $\varepsilon_\theta(0)$ . On admet que la composante verticale de la vitesse du ballon-sonde n'est pas modifiée par la perturbation considérée. On se propose alors d'étudier l'influence de cette perturbation, supposée petite, sur le mouvement d'ascension du ballon-sonde. Pour cela on pose à un instant  $t \geq 0$  :

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = V + \varepsilon_y(t) \\ \theta(t) = \varepsilon_\theta(t) \end{cases} \quad (8)$$

et on considère  $\varepsilon_y(t)$  et  $\varepsilon_\theta(t)$  comme petits.

**2.6.1** Vérifier, qu'au premier ordre non nul, le module  $U$  de  $\vec{U}$  n'est pas modifié par la perturbation.

**2.6.2** En linéarisant les équations différentielles dont  $\varepsilon_y(t)$  et  $\varepsilon_\theta(t)$  sont les solutions montrer que :

$$\begin{cases} M \frac{d\varepsilon_y}{dt} + \alpha_1 \varepsilon_y = \alpha_2 \frac{d\varepsilon_\theta}{dt} \\ J \frac{d^2\varepsilon_\theta}{dt^2} + \alpha_3 \frac{d\varepsilon_\theta}{dt} + \alpha_4 \varepsilon_\theta = \alpha_2 \varepsilon_y \end{cases} \quad (9)$$

et donner les expressions des constantes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  et  $\alpha_4$  en fonction de  $k$ ,  $U_0$ ,  $\ell_1$ ,  $M$  et  $g$ . Calculer numériquement ces constantes.

**2.6.3** On cherche des solutions de (9) sous forme harmonique telle que :

$$\begin{cases} \varepsilon_y(t) = A \exp \omega t \\ \varepsilon_\theta(t) = B \exp \omega t \end{cases} \quad (10)$$

où  $A$ ,  $B$  et  $\omega$  sont trois constantes réelles ou complexes.

**2.6.3.1** Montrer que  $A$  et  $B$  sont quelconques et  $\omega$  est solution de l'équation de troisième degré :

$$\omega^3 + C_1\omega^2 + C_2\omega + C_3 = 0 \quad (11)$$

et donner les expressions littérales et calculer les valeurs numériques des constantes  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$ .

**2.6.3.2** La résolution numérique de (11) donne les solutions :

$$\begin{cases} \omega_1 = -\frac{1}{\tau_1} \\ \omega_2 = -\frac{1}{\tau_2} + i\Omega \\ \omega_3 = -\frac{1}{\tau_2} - i\Omega \end{cases} \quad (12)$$

avec  $\tau_1 = 0,30 \text{ s}$ ,  $\tau_2 = 3,14 \text{ s}$  et  $\Omega = 1,70 \text{ s}^{-1}$ .

En déduire la solution générale de (9) en déterminant les constantes d'intégration à l'aide de conditions initiales adéquates que l'on précisera.

**2.6.3.3** Interpréter les solutions obtenues et discuter de la stabilité horizontale du mouvement du ballon-sonde dans le régime établi. Quel est le temps  $\delta t$  au bout duquel l'effet de la perturbation horizontale se dissipe à 99% ?

**fin de l'énoncé**