

**CONCOURS EXTERNE SPÉCIAL POUR LE RECRUTEMENT
D'ÉLÈVES INGÉNIEURS DES TRAVAUX DE LA MÉTÉOROLOGIE
ET
D'ÉLÈVES INGÉNIEURS DE L'ÉCOLE NATIONALE DE LA MÉTÉOROLOGIE
SESSION 2020**

ÉPREUVE ÉCRITE OBLIGATOIRE

PHYSIQUE DE L'ATMOSPHÈRE

Durée : 4 heures

Coefficient : 8

La rigueur, le soin et la clarté apportés à la rédaction des réponses seront pris en compte dans la notation.
L'utilisation d'une calculatrice de poche, standard, programmable, alphanumérique ou à écran graphique est autorisée à condition que son fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante ni dispositif externe de stockage (cartes, clé usb, etc). Elle devra être utilisée en mode examen.
L'utilisation de toute documentation sur support papier ou électronique est strictement interdite.

Documents fournis avec les copies : deux émagrammes.

Cette épreuve aborde trois domaines différents :

- Exercice I : MÉTÉOROLOGIE DYNAMIQUE pages 3 à 5 – 2 parties – 6 points
- Exercice II : MÉTÉOROLOGIE GÉNÉRALE pages 6 à 11 – 3 parties – 7 points
- Exercice III : COUCHE LIMITE pages 12 à 14 – 2 parties – 7 points

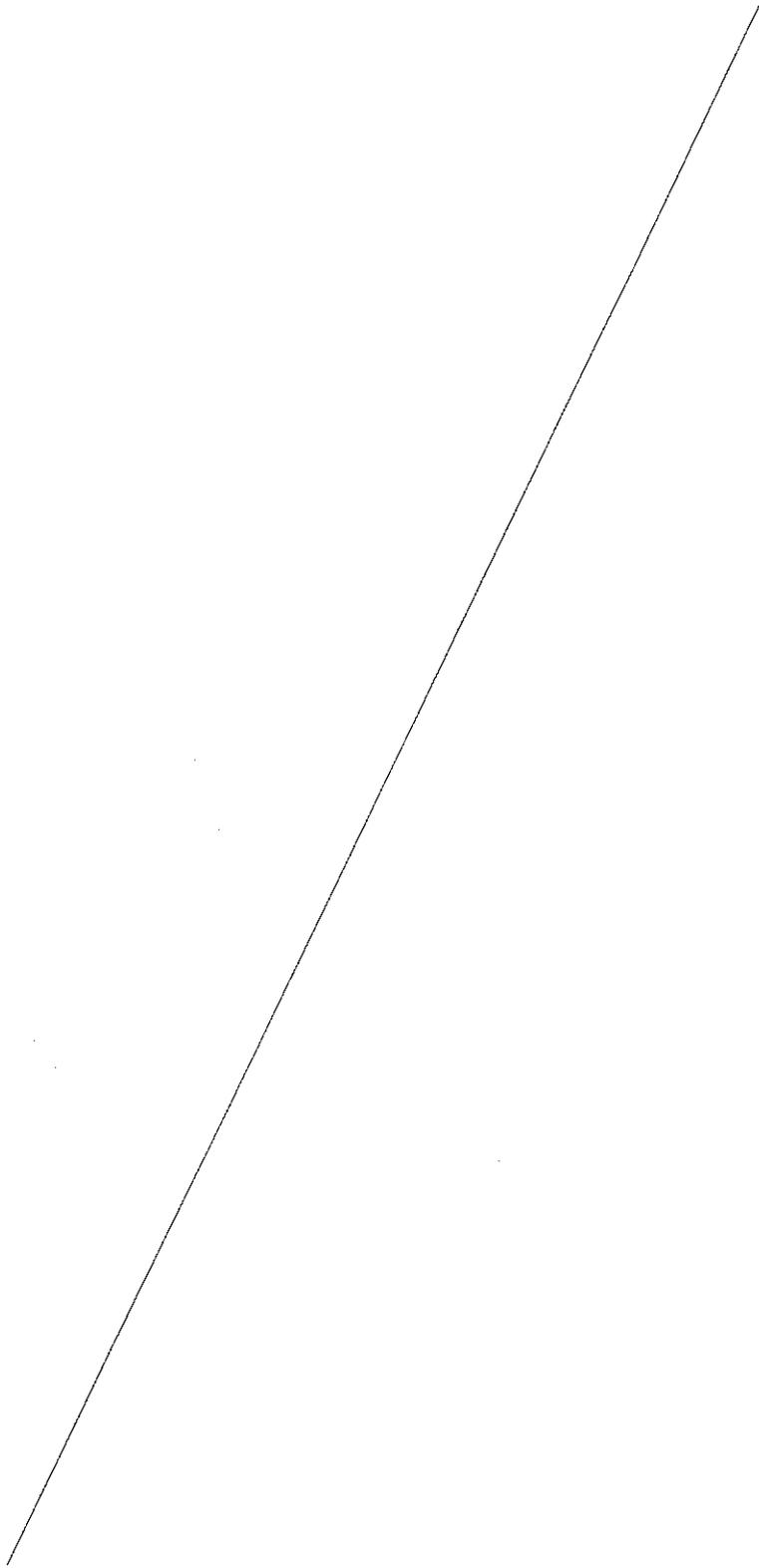
Le candidat doit traiter l'ensemble de l'épreuve.

IMPORTANT : CHACUNE DES PARTIES I, II et III DOIT ÊTRE RÉDIGÉE SUR UNE COPIE SÉPARÉE

Pour tout document annexe rendu avec la copie, le candidat portera sur celui-ci le nom du centre d'examen où il passe l'épreuve, le numéro de place occupée et la partie concernée. Aucune autre information d'identification ne devra être présente sur ces documents.

En haut et à gauche de chacune des copies doubles et des documents annexes, le candidat devra porter un numéro d'ordre (1/N, 2/N, N correspondant au nombre total de documents rendus)

Ce sujet comporte 14 pages (page de garde incluse).



Exercice I : Météorologie dynamique

Partie I : équilibres de grande échelle

On considère les équations du mouvement horizontal et vertical, sur un plan tangent, hors de la couche limite, dans le système de Boussinesq :

$$\frac{D\vec{V}_h}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \vec{\nabla}_h \tilde{P} - f \vec{k} \wedge \vec{V}_h \quad (1)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial z} + \frac{\tilde{\theta}}{\theta_0} g \quad (2)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

$\vec{V}_h(u, v) = \vec{V}_h(x, y, z, t)$: vecteur vent horizontal

$w = w(x, y, z, t)$: vitesse verticale

ρ_0 = densité (constante)

$\tilde{P} = \tilde{P}(x, y, z, t)$: anomalie de pression par rapport à une atmosphère de référence au repos

f : paramètre de Coriolis

$\tilde{\theta} = \tilde{\theta}(x, y, z, t)$: anomalie de température potentielle par rapport à une atmosphère de référence au repos

$\theta_0 = 300K$: température potentielle caractéristique de la troposphère

g : gravité

- 1) Définir et formaliser l'équilibre hydrostatique à partir de ces équations.
- 2) Définir et formaliser l'équilibre géostrophique à partir de ces équations.
- 3) Etablir l'expression vectorielle du vent géostrophique \vec{V}_g .
- 4) Dans le cas de l'approximation du f -plan, démontrer que le vent géostrophique est non-divergent et que le tourbillon géostrophique ξ_g est lié au laplacien horizontal du champ de pression $\Delta_h \tilde{P}$.

Partie II : Dynamique de grande échelle

On se place dans le cadre de l'approximation du f -plan. On considère les formes quasi-géostrophiques des équations du tourbillon et de la thermodynamique adiabatique :

$$\frac{D_g \xi_g}{Dt} = f_0 \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{D_g \tilde{\theta}}{Dt} = -\frac{\theta_0}{g} N_0^2 w \quad (4)$$

$$\frac{D_g}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_g \frac{\partial}{\partial x} + v_g \frac{\partial}{\partial y}$$

$$\vec{V}_g(u_g, v_g) = \vec{V}_g(x, y, z, t) : \text{vecteur vent géostrophique}$$

$$N_0^2 = \frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} : \text{fréquence de Brunt-Vaisala de l'atmosphère de référence}$$

- 1) En déduire la conséquence :
 - d'une ascendance adiabatique sur l'évolution locale de la température.
 - d'une ascendance de grande échelle sur l'évolution d'un tourbillon cyclonique au voisinage du sol.
 - d'une ascendance de grande échelle sur l'évolution d'un tourbillon cyclonique au voisinage de la tropopause.

- 2) A partir des équations (3) et (4), démontrer que $\frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial \xi_g}{\partial t} = \frac{g}{f_0 \theta_0} \Delta_h \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t}$.

- 3) En déduire l'équation diagnostique pour la vitesse verticale de grande échelle :

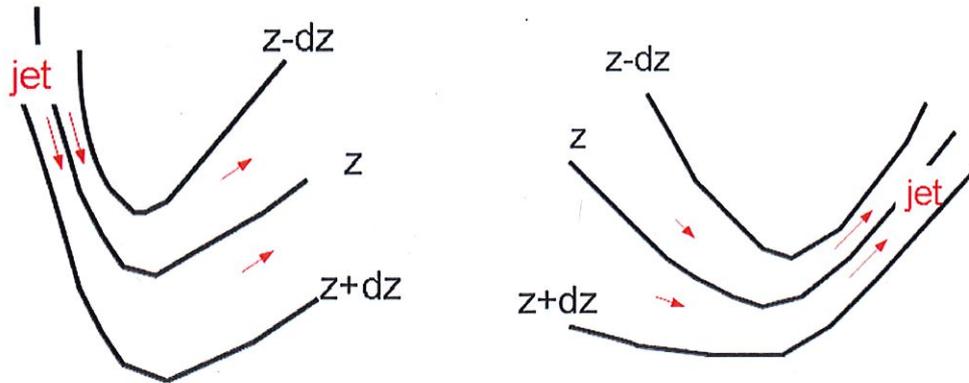
$$\left(\Delta_h + \frac{f_0^2}{N_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) w = \frac{g}{N_0^2 \theta_0} \Delta_h \left(-\vec{V}_g \cdot \vec{\nabla}_h \tilde{\theta} \right) - \frac{f_0}{N_0^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(-\vec{V}_g \cdot \vec{\nabla}_h \xi_g \right) \quad (5)$$

- 4) D'après l'équation (5) préciser les forçages responsables d'ascendances (respectivement de subsidences) de grande échelle.
- 5) A partir des équations (3) et (4), éliminer w pour obtenir l'équation QG de la tendance de pression :

$$\left(\frac{1}{\rho_0 f_0} \Delta_h + \frac{f_0}{\rho_0 N_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \frac{\partial \tilde{P}}{\partial t} = -\vec{V}_g \cdot \vec{\nabla}_h (\xi_g) + \frac{f_0}{N_0^2} \frac{g}{\theta_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(-\vec{V}_g \cdot \vec{\nabla}_h (\tilde{\theta}) \right) \quad (6)$$

- 6) D'après l'équation (6) préciser les advections de tourbillon géostrophique et les advections différentielles de température responsables d'une baisse (respectivement hausse) locale de la pression.

- 7) En utilisant l'équation (6), indiquer comment va évoluer le thalweg d'altitude dans les deux configurations suivantes (jet à l'ouest du thalweg, jet à l'est du thalweg) :



- 8) A l'avant d'un front chaud actif, on observe souvent un maximum local d'advection chaude en milieu de troposphère. Ceci est-il favorable :
- à la construction d'une dorsale d'altitude
 - à la construction d'un thalweg d'altitude
 - à un creusement en basses couches
 - à un comblement en basses couches

Plusieurs réponses possibles. Justifier la réponse en se basant sur l'équation (6)

- 9) A l'arrière d'un front froid actif, on observe souvent un maximum local d'advection froide en milieu de troposphère. Ceci est-il favorable :
- à la construction d'une dorsale d'altitude
 - à la construction d'un thalweg d'altitude
 - à un creusement en basses couches
 - à un comblement en basses couches

Plusieurs réponses possibles. Justifier la réponse en se basant sur l'équation (6)

Exercice II : MÉTÉOROLOGIE GÉNÉRALE

Bilan radiatif – effet de serre

L'effet de serre est un mécanisme essentiel à la compréhension de la structure thermique moyenne de l'atmosphère et à la mise à l'équilibre du système climatique. Pour illustrer cet effet de serre nous allons considérer successivement deux modèles simplifiés d'atmosphère puis un modèle plus réaliste.

Données :

Constante solaire : $S = 1368 \text{ W.m}^{-2}$

Albédo moyen du système : $\alpha = 0.3$

Constante de Stephan : $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

Modèle n°1 : sans atmosphère

Dans ce premier modèle, on considère qu'il n'y a pas d'atmosphère sur Terre.

- 1) Déterminer la puissance surfacique moyenne arrivant au sommet de l'atmosphère en fonction de S .
- 2) En considérant que la Terre se comporte comme un corps noir sphérique à température uniforme, calculer la température d'équilibre radiatif T_1 sur Terre. Commenter.

Modèle n°2 : atmosphère à une couche

On considère à présent une couche atmosphérique uniforme située entre la surface et l'espace. Pour simplifier, on suppose que cette couche est complètement opaque au rayonnement infrarouge émis par la surface, mais intégralement transparente au rayonnement solaire. On suppose également que cette couche se comporte comme un corps noir émettant le même rayonnement vers le haut et vers le bas.

- 3) Ecrire l'équilibre radiatif du système climatique, en considérant que la surface terrestre et la couche atmosphérique émettent autant d'énergie qu'elles en reçoivent.
- 4) Dans ce modèle, déduire les températures d'équilibre de la Terre T_2^{Terre} et de l'atmosphère T_2^{atm} . Commenter.

Modèle n°3 : atmosphère multicouche

On peut obtenir une atmosphère plus réaliste avec un modèle multicouche et en raffinant le comportement de chaque couche. On parle alors de modèle purement radiatif. Ce modèle permet de restituer une température proche de la température réellement observée. En revanche, comme le montre la figure ci-dessous, il ne permet pas de reproduire le profil vertical moyen de la température observée. Pour quelles raisons ?

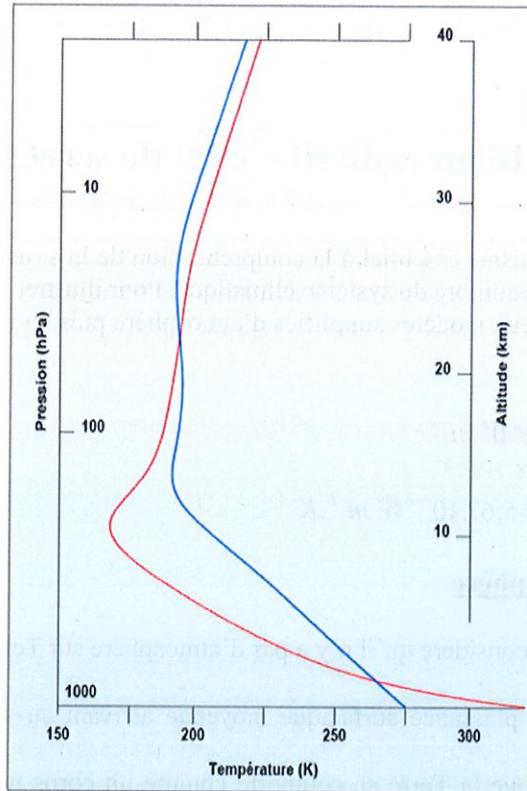


Fig 1) Profil vertical de température solution de l'équilibre radiatif pour une atmosphère multicouche selon le modèle n°3 (courbe rouge) La courbe en bleu correspond à une atmosphère dont le taux de décroissance verticale de la température est celui de l'atmosphère standard (-6,5 C par km).