

EXAMEN DU COURS DE DYNAMIQUE DE LA TROPOSPHERE

Session 2006

B. Legras, A. Martin

17 février 2005 - Durée 2h30 - sans documents

1 Densité potentielle

Le but de cet exercice est de déterminer des invariants ayant la dimension d'une densité pour les transformations adiabatiques humides.

Liste des notations à employer dans cet exercice (toutes les quantités sont par unité de masse) :

R_d	constante des gaz pour l'air sec
R_v	constante des gaz pour la vapeur d'eau
$\epsilon = R_d/R_v$	
c_{pd}	capacité calorifique à pression constante pour l'air sec
c_{pv}	capacité calorifique à pression constante pour la vapeur d'eau
c_{vd}	capacité calorifique à volume constant pour l'air sec
c_{vv}	capacité calorifique à volume constant pour la vapeur d'eau
c_l	capacité calorifique de l'eau liquide
p_d	pression de l'air sec
e	pression partielle de la vapeur d'eau
e^*	pression partielle saturante de vapeur d'eau
$p = p_d + e$	pression totale
ρ_d	densité de l'air sec
ρ_v	densité de la vapeur d'eau
ρ_l	densité de l'eau liquide
ρ	densité totale
$r = \rho_v/\rho_d$	rapport de mélange de la vapeur d'eau en masse
$r_l = \rho_l/\rho_d$	rapport de mélange de l'eau liquide
$r_T = r + r_l$	rapport de mélange de l'eau totale
L	chaleur latente de vaporisation

1. Montrez que

$$e = \frac{r}{\epsilon} p_d, \quad \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{r}{1 + r_T}, \quad \frac{\rho_d}{\rho} = \frac{1}{1 + r_T}.$$

Exprimez de même les rapports p_d/p et e/p .

2. Montrez que l'entropie de l'air sec est par unité de masse

$$s_d = -c_{pd} \ln \frac{\rho_d}{\rho_0} + c_{vd} \ln \frac{p_d}{p_0}$$

où ρ_0 et p_0 sont des constantes arbitraires de normalisation.

3. En vous appuyant sur une expression analogue pour la vapeur d'eau, et en utilisant les relations établies en 1), montrez que l'entropie de l'air humide non saturé (avec $r_l = 0$ et $e < e^*$) est (par unité de masse d'air sec)

$$s = -(c_{pd} + rc_{pv}) \ln \frac{\rho}{\rho_0} + (c_{vd} + rc_{vv}) \ln \frac{p}{p_0} + F(r)$$

(il n'est pas requis d'explicitier $F(r)$).

4. Montrez que cela permet d'introduire une densité potentielle

$$\rho_{\text{pot}} = \rho \left(\frac{p_0}{p} \right)^\chi$$

conservée pour toute transformation adiabatique réversible de l'air humide non saturé. Donnez l'expression de χ .

5. On s'intéresse maintenant au cas de l'air humide saturé ($e = e^*$ et $r_l > 0$). On donne l'entropie de l'eau liquide $s_l = c_l \ln(T/T_0)$ et la relation $L = T(s_v^* - s_l)$ où s_v^* indique l'entropie de la vapeur d'eau saturante. Ecrivez l'entropie de l'air humide saturé et en éliminant r au profit de r_T et r_l faites apparaître L en facteur de r_l .
6. Développer l'expression de l'entropie en éliminant toujours r (indication : utilisez $\epsilon + r = \epsilon + r_T - r_l = (\epsilon + r_T)(1 - r_l/(\epsilon + r_T))$).
7. En manipulant l'expression de l'entropie par l'ajout de termes constants appropriés, faites apparaître que l'on peut définir une densité potentielle équivalente liquide

$$\rho_l = \rho \left(\frac{p_0}{p} \right)^\chi \left(1 - \frac{r_l}{\epsilon + r_T} \right)^A \left(1 - \frac{r_l}{r_T} \right)^B \exp(LC).$$

Donnez les expressions de A , B et C .

8. A quoi se ramène cette expression lorsque $r_l = 0$? Que peut-on en déduire sur la conservation de ρ_l ? Dans le cas d'une transformation pseudo-adiabatique, qu'est ce qui est conservé?
9. Quel type de comparaison doit-on faire pour déterminer la stabilité conditionnelle de l'atmosphère en utilisant les quantités définies ici?

2 Etude de données météorologiques

Les questions qui suivent s'enchaînent naturellement, mais sont largement indépendantes. Elles s'attachent à décrire et expliquer des données, en prenant appui sur des éléments de cours vus en cours et TD. Il n'est a priori pas nécessaire d'écrire des équations sauf quand cela est explicitement demandé, ou pour un calcul d'ordre de grandeur.

2.1 A l'échelle planétaire

FIG. 1 - .

1. Commenter la fig. ?? . Que représente-t-elle ? Comment varie la quantité représentée sur un cercle de latitude ? Qu'elle est l'origine de cette variation ?
On s'intéressera notamment à comparer chacun des hémisphères entre eux, ainsi que les situations d'hiver et d'été pour chaque hémisphère. Donnez une explication à ces différences.

Anomalies de Vorticité Potentielle (VP) :

2. Rappeler la définition de la VP d'Ertel. Pourquoi à-t-on construit cette quantité ? En quoi généralise-t-elle la vorticité ?
3. Donner l'expression simplifiée de la VP en coordonnées isentropes.
4. A partir de cette dernière formule, expliquez ce qu'est une anomalie de VP par rapport à un état de référence hydrostatique.
Donner les caractéristiques d'une anomalie de VP positive ou négative, selon qu'elle se trouve près de la tropopause ou au contraire près du sol.
Quelle anomalie de température voit-on dans chacune de ces situations si l'on se place au milieu de la troposphère ?

La fig. ?? présente la situation du 13/02/2006.

5. En comparant avec les figures précédentes, décrivez les variations de la quantité représentée et expliquez avec un schéma simple comment ces variations se propagent. Quel est le sens de propagation (absolu et relatif) ?
Quel rôle joue le jet décrit en 1. dans l'existence et la position de cette structure (on pourra aussi faire un schéma).
Citer des forçages de cette structure. Peut-on expliquer la position des jets intenses ?
6. *Question subsidiaire :*
Retrouver l'équation du phénomène décrit dans la question précédente, dans le cas d'un écoulement barotrope non divergent, pour lequel la vorticité est conservée.
On pourra ajouter un écoulement de base zonal cisailé $U(y) \mathbf{e}_x$ pour expliquer son effet.

FIG. 2 - .

2.2 Une perturbation sur l'océan atlantique le 11/02/2006

La fig. ?? représente une structure typique de la météorologie synoptique dans l'océan atlantique, observée dans l'après-midi du 11/02/2006. La situation météorologique correspondante,

FIG. 3 – .

déterminée par les centres de prévision météorologique est rendue par la région encadrée dans les cartes de la fig. ?? (on fera attention à la légende).

1. Quelle information nous donne la comparaison globale du champ de géopotential à 500 hPa et de la température de surface, sur le comportement dynamique de l'atmosphère dans la région englobée par ces cartes ? (ne pas se restreindre à la zone encadrée). On pourra écrire les lois énoncées en coordonnées isobares.
2. Décrire schématiquement la structure encadrée sur les cartes, en insistant sur les éléments qui vous semblent importants (pression, vent, vorticité, température, advection...). On distinguera les basses couches (surface et 850 hPa) de la moyenne troposphère (500 hPa).
Dessiner qualitativement les fronts sur chacune des cartes (en traits noirs epais)
3. En accord avec les 2 précédentes questions, indiquez approximativement où l'on doit s'attendre à voir une ascension, ou une subsidence. Répondre sur la fig. ?? qui schématise la structure à 500 hPa.
4. En utilisant le vecteur \mathbf{Q} , retrouver le résultat pr c dent. On déterminera pour cela l'orientation de \mathbf{Q} aux points A, B, et C (en justifiant).
On rappelle que dans un système d'axes X et Y local que l'on précisera :

$$\mathbf{Q} = -\frac{R}{p} \left| \frac{\partial T}{\partial Y} \right| \left(\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial X} \right), \quad (1)$$

et l'équation de la vitesse verticale s'écrit, et l'absence de chauffage diabatique et d'effet beta :

$$\sigma \nabla^2 \omega + f_0^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q}. \quad (2)$$

5. La structure des nuages observée en fig. ?? est-elle grossièrement cohérente avec les résultats précédents ? Pourquoi ? Dessiner qualitativement les fronts de la question 2. sur sur l'image de la fig. ??.
6. Sur la fig. ??, indiquer localement quel type de processus cinématique qui conduit majoritairement à la frontog nese.
7. Commenter le décalage vertical observé entre les deux couches (surface et 500 hPa) ? Cela vous paraît-il favorable à une amplification de la frontog nese ?
Pour justifier, on expliquera le phénomène en terme d'interaction entre deux anomalies de température haute et basse dans une région barocline. On expliquera notamment comment chacune de ces anomalies se propage par rapport à l'écoulement moyen (on pourra les représenter comme deux modes de Eady de bord), le(s) phénomène(s) qui les aident à interagir et mutuellement, et à s'amplifier ou se détruire. On s'intéressera à une seule configuration d'interaction, jugée représentative du cas réel observé.
Comment s'appelle cette instabilité ?
8. Dans le quart nord-ouest de la photo fig. ??, à quoi peut-on éventuellement attribuer les formations en bande des nuages qui sont au sud et sud-ouest du centre de la perturbation ?

FIG. 5 – .

FIG. 4 – .

2.3 Un radio-sondage en islande le 13/02/2006

La fig. ?? représente un radiosondage effectué en Islande le 13/02/2003 à 00h00 GMT.

1. Que représentent les deux courbes verte et rouge du profil ?
Définir aussi les 4 familles de courbes tracées sur le fond de l'emagramme.
2. Ce profil est-il plutôt sec ou humide et pourquoi ?
3. Peut-il donner lieu à de la convection ? à quel niveau ? Autrement dit qualifiez sa stabilité selon le niveau.

FIG. 6 - .