

TP#10

Les forces et les mouvements dans l'atmosphère

Matériel nécessaire : Notes de cours; Copie imprimée de ce document; Crayons; Calculatrice

Introduction

Les vents existent parce que des forces agissent sur l'air. Ces forces sont :

- La force de la gravité qui agit dans la direction verticale;
- La force de gradient de pression créée par la variation de la pression dans l'espace;
- La force de Coriolis créée par la rotation de la Terre;
- La force de frottement provoquée par la viscosité et la turbulence de l'air.

Tableau 10.1 : Les forces horizontales agissant sur l'air dans le référentiel fixé à la surface terrestre

Force/masse	Direction	Grandeur
Gradient de pression, $ \vec{a}_{GP} = a_{GP} = \left -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta n} \right = \left -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} \right $ où ρ est la densité de l'air, $\Delta p = p_2 - p_1$ et $\Delta n = d$ est la distance entre les isobares p_2 et p_1. À ne pas oublier que la distance entre deux lignes est toujours la distance la plus courte entre elles (gradient de pression) dans la région de la mesure. C'est-à-dire, d est localement perpendiculaire aux deux isobares.	Des hautes vers les basses pressions	Proportionnelle à la différence de pression entre les deux points, à la distance qui les sépare et à la densité de l'air.
Coriolis, $ \vec{a}_C = a_C = 2\Omega \cdot \sin \varphi \cdot \vec{V} = 2\Omega \cdot \sin \varphi \cdot V$ où Ω est la vitesse de rotation de la Terre, φ la latitude et V le module de la vitesse.	Perpendiculaire à la trajectoire : • À droite du mouvement dans l'hémisphère Nord • À gauche du mouvement dans l'hémisphère Sud	Dépend de l'intensité du vent ($ \vec{V} = V$) et de la latitude (φ).
Frottement, $a_f = -K \cdot f(V)$ Où K est un paramètre dépendant de la rugosité du terrain et $f(V)$ une fonction de la vitesse qui dépend de la stabilité thermique.	Opposée au sens de l'écoulement	Dépend de la rugosité de la surface et de la vitesse du vent.

Force de gravité, équilibre quasi-hydrostatique et isohypses

Dans l'atmosphère, la force gravitationnelle est en quasi-équilibre avec la composante verticale de la force de gradient de pression.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial Z} = -g_0, \quad \text{où } p \text{ est la pression atmosphérique, } z \text{ la hauteur géométrique, } Z \text{ la}$$

hauteur géopotentielle, g la gravité (qui dépend de la latitude φ et de z) et $g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$ est la valeur moyenne de l'accélération de la gravité au niveau moyen de la mer. La hauteur géopotentielle est la hauteur des surfaces d'énergie potentielle constante. Dans la basse atmosphère, la hauteur géopotentielle Z est très proche de la hauteur géométrique puisque g ne varie pas beaucoup ni avec la latitude (exercice 10.3) ni avec z dans la troposphère.

Les cartes météorologiques en altitude sont des cartes de surfaces isobariques. Les lignes de contour qu'on y trouve sont les lignes de hauteur géopotentielle constante. Elles sont nommées isohypses.

L'équation hydrostatique nous permet de connaître la hauteur géopotentielle à laquelle se situe une pression p_B si on connaît la densité de l'air en fonction de la pression et la pression p_A à une hauteur géopotentielle donnée Z_{pA} . En utilisant l'équation des gaz parfaits et la définition de température virtuelle, on obtient **l'équation psychrométrique**:

$$Z_{p_B} - Z_{p_A} = \frac{R_d}{g_0} \int_{p_B}^{p_A} T \cdot \frac{dp}{p} = \frac{R_d \bar{T}_V}{g_0} \ln \frac{p_A}{p_B},$$

où $\bar{T}_V$ est la température virtuelle moyenne de la couche d'air située entre les deux niveaux de pression.

On voit que la distance entre les deux niveaux de pression, **épaisseur de la couche**, dépend de la température virtuelle moyenne de la couche.

Exercice 10.1 : La température virtuelle décroît linéairement avec la pression de 1000 à 500 hPa. À Montréal, la température à 500 hPa est -30°C et l'épaisseur $Z_{500} - Z_{1000}$ hPa est 5180 m. Quelle est la température virtuelle (à Montréal) au niveau de pression 1000 hPa? Rép : 267 K = -6°C

Force de gradient de pression horizontale

Exercice 10.2

Les brises de mer se forment le long des régions côtières comme réponse au réchauffement différentiel du continent et de l'océan. Quelle sera la différence de pression moyenne nécessaire pour produire une brise de mer de 20 nœuds, sur une étendue horizontale de 100 km, après une période de 3h? La densité de l'air (ρ) est égale à 1.29 kg/m^3 . Supposez que la seule force importante est la force de gradient de pression (on néglige la force de frottement et la force de Coriolis). Note : 1 nœud = 0,5 m/s.

Forces apparentes dues à la rotation de la Terre

La deuxième loi de Newton permet de calculer l'accélération de l'air si on connaît les forces qui lui sont appliquées. Or, la loi de Newton est valide dans un référentiel au repos ou en mouvement uniforme et rectiligne (sans accélération). Comme la Terre est en rotation, le mouvement de l'air que nous observons se fait dans un référentiel accéléré. L'accélération relative du référentiel terrestre est prise en compte en introduisant des forces apparentes : la force de Coriolis et la force centrifuge. La force centrifuge due à la rotation de la terre est introduite comme une correction de l'accélération de la gravité.

Exercice 10.3

- À quelle latitude la force centrifuge due à la rotation de la Terre est maximale?
- À quelle latitude est-elle nulle?
- La résultante de la force de gravité et de la force centrifuge définit la direction verticale locale. Est-ce que la verticale locale pointe toujours vers le centre de la Terre? Justifiez.

Exercice 10.4

- L'accélération de Coriolis (ou force de Coriolis) dépend de quelles variables?
- Que représente physiquement le terme $\Omega \sin \phi$?
- À quelle latitude la force de Coriolis est nulle?

Force de frottement

Proche de la surface, la force de frottement provoquée par la présence de la surface et la turbulence engendrée par celle-ci est aussi importante que les autres forces. Elle est en général proportionnelle à l'intensité du vent et agit en sens contraire à celui du vent. Loin de la surface, elle est négligeable par rapport aux autres forces.

Exercice 10.5

Choisissez la meilleure réponse : Une des causes de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur au-dessus de la surface terrestre est :

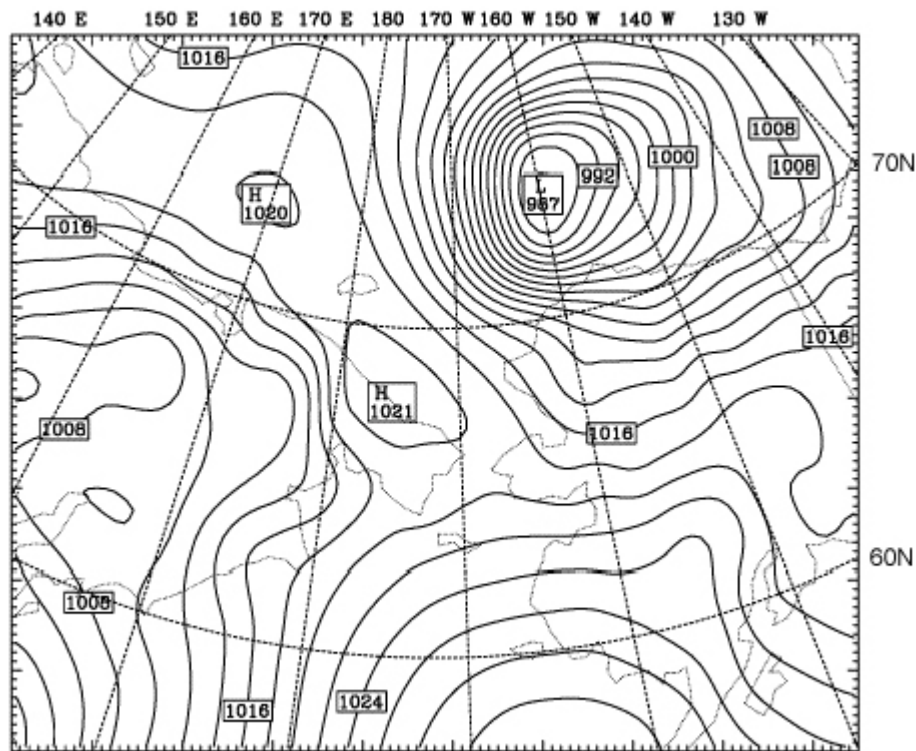
- Le fait que seulement l'air proche de la surface tourne avec la Terre
- La température de l'air décroît, en général, avec la hauteur
- Les mesures du vent ne sont pas adéquates proche de la surface
- Le frottement ralentit les déplacements de l'air proche de la surface
- Les parcelles d'air dilatent et sont moins denses au fur et à mesure qu'elles montent dans l'atmosphère

Les vents à la surface et le frottement

Les vents proches de la surface sont influencés par le frottement, qui agit dans la direction opposée à celle du vent, en les ralentissant. La grandeur de la force de frottement dépend de la «rugosité» de la surface. Par exemple, les villes, ou une forêt, ralentissent plus le vent que des surfaces gazonnées ou des plans d'eau.

Exercice 10.6 : La figure 10.1 montre une carte des isobares au niveau de la mer, où est visible un fort centre de basse pression.

- Calculez la force de gradient de pression horizontale entre le centre de basse pression et le centre de haute pression localisé à l'ouest, en supposant que la densité de l'air est de 1 kg/m^3 . À cette latitude, un degré de longitude équivaut (approximativement) à la distance de 28 km.
- Une parcelle d'air de 1 kg est initialement au repos à 175°O , 75°N . Dans quelle direction se déplacera initialement la parcelle sous l'action du champ de pression représenté dans la carte?
- Si la seule force agissant sur la parcelle est celle due au gradient de pression, après combien de temps la vitesse de la parcelle sera de 35 m/s ?
- Quelles sont les autres forces qui vont agir sur la parcelle, une fois que celle-ci commence son mouvement?
- Donnez la trajectoire probable de la parcelle d'air en réponse à toutes les forces qui agissent sur elle.



Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc. or related companies. All rights reserved.

Figure 10.1 : Carte de surface : pression au niveau moyen de la mer.
Alaska, août 2000.

L'écoulement en altitude : équilibre géostrophique

Exercice 10.7 : la figure 10.2 montre deux isohypses au niveau de pression de 500 hPa. En supposant qu'on est à la latitude de 45°S et que l'accélération des parcelles d'air est nulle,

1. calculez la grandeur et la direction de
 - I. la force de gradient de pression. La distance entre les deux isohypses est égale à 200 km.
 - II. la force de Coriolis
2. faites le diagramme des forces de gradient de pression et de Coriolis qui agissent sur une parcelle d'air représentée par le carré dans la figure 10.2, ainsi que le vecteur représentant la vitesse du vent qui en résulte. R : voir ppt
3. déterminez la grandeur de ce vent. Comment est-il nommé?

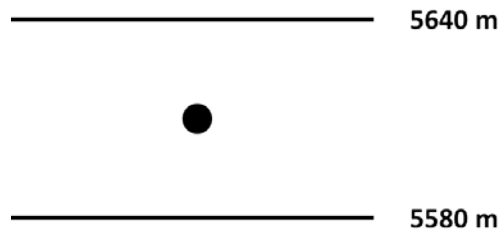


Figure 10.2 : isohypses au niveau de 500 hPa, dans l'hémisphère Sud. Le cercle représente une parcelle d'air.

Force centripète versus force centrifuge

Quand les trajectoires des parcelles d'air ne sont pas rectilignes ou sont accélérées, la résultante des forces qui agissent sur l'air est différente de zéro. Si leur trajectoire n'est pas rectiligne, la résultante des forces a une composante centripète. Dans un référentiel fixé à la parcelle, cette accélération est interprétée comme une force d'égale grandeur et de direction opposée : la force centrifuge - à ne pas confondre avec la force centrifuge due à la rotation de la Terre! Elle est une pseudo-force existante dans un référentiel fixé sur la parcelle d'air. Dans ce référentiel, elle compense exactement l'accélération centripète due au déséquilibre des forces qui agissent sur la parcelle : voir tableau 10.1. Elle est perpendiculaire à la trajectoire et son sens est centrifuge (d'où son nom...). **Nous observons les mouvements à partir d'un référentiel attaché à la surface terrestre. C'est pour ça que je préfère parler de force résultante centripète = Somme vectorielle de la force de gradient de pression et de la force de Coriolis.**

L'écoulement en altitude : équilibre gradient

Le vent gradient correspond à la circulation de l'air parallèle aux isobares ou isohypses où la seule accélération est centripète (le vent ne croise pas les isolignes de pression ou d'hauteur géopotentielle). Le vent gradient est une meilleure approximation du vent réel que le vent géostrophique. Les deux vents deviennent identiques quand les isolignes sont droites puisque dans ce cas, l'accélération centripète est nulle.

Exercice 10.8

La figure 10.3 représente l'écoulement en altitude autour d'un centre de basse pression et d'un centre de haute pression en altitude.

1. Dans quel hémisphère se situent les systèmes météorologiques?
2. Dans la figure 10.3, les carrés représentent des parcelles d'air. Dessinez les vecteurs représentant les forces de gradient de pression et de Coriolis qui agissent sur ces parcelles. Notez que la grandeur du gradient de pression est identique pour tous les six points. Les flèches montrent la direction de l'écoulement (parallèle aux isolignes).
3. Pourquoi la vitesse du vent gradient est plus grande autour de la dépression qu'autour de la haute pression?
4. Examinez l'écoulement réel représenté dans la figure 10.4. Est-ce que l'écoulement dans les creux et les crêtes confirme les conclusions tirées à la question 3.?
5. Comment expliquer les différences entre l'écoulement réel (figure 10.4) et l'écoulement théorique représenté dans la figure 10.3?

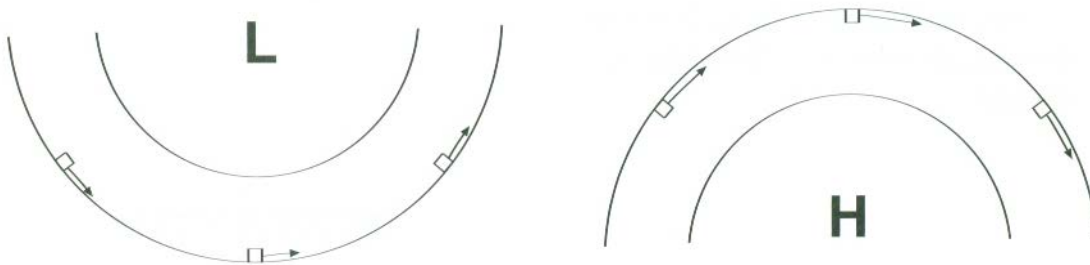


Figure 10.3 : Circulation idéale en altitude au tour d'un centre de basse pression et d'un centre de haute pression.

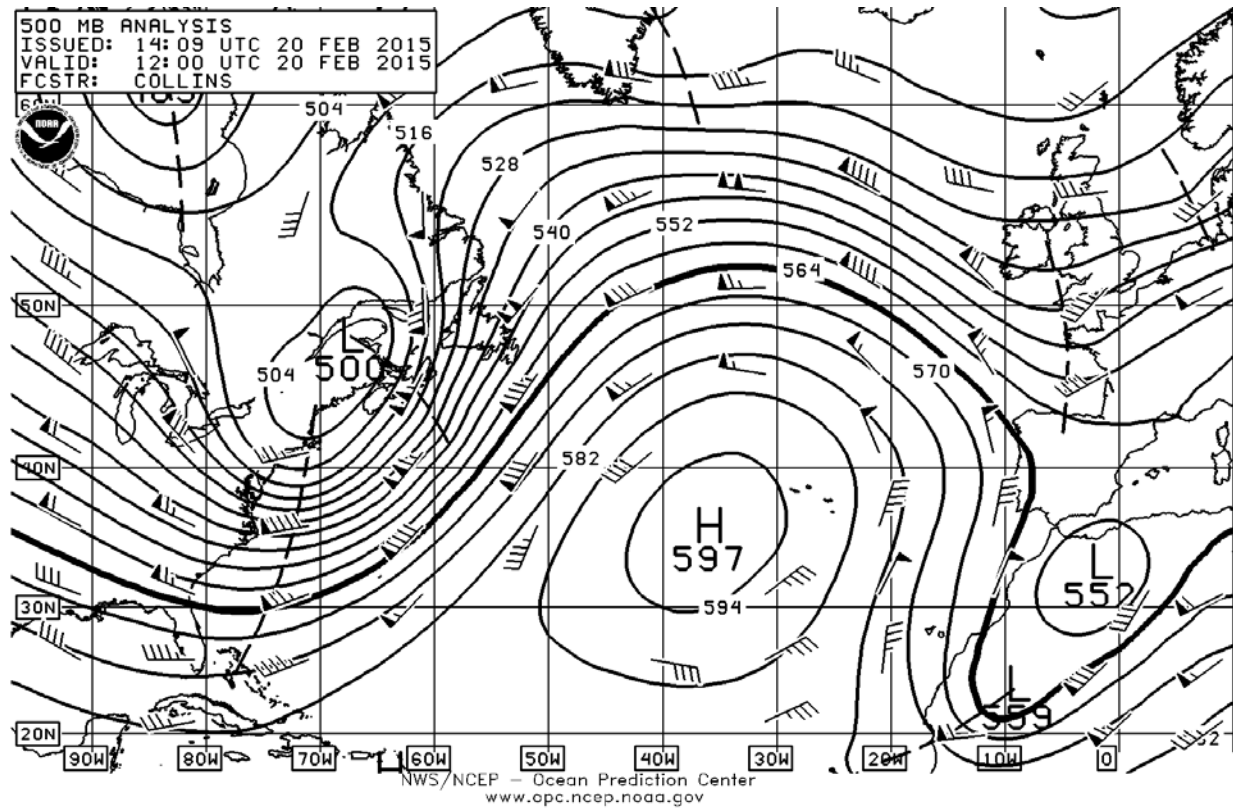


Figure 10.4 – carte d'analyse à 500 mb, données à 12 :00 UTC, le 20 février 2015.

Source : http://www.nws.noaa.gov/om/marine/hfmarsh_mobile.htm

Bibliographie :

Carbone, Greg : Weather and Climate, 2007. 204 pp.

Monteiro, E : SCA2626, notes de cours, 2017.

Lynch, Amanda et J. Cassano : Applied atmospheric Dynamics, 2006. 208 pp.

Pour en savoir plus sur l'écoulement gradient :

<http://www2010.atmos.uiuc.edu/%28Gh%29/guides/mtr/fw/grad.rxml>