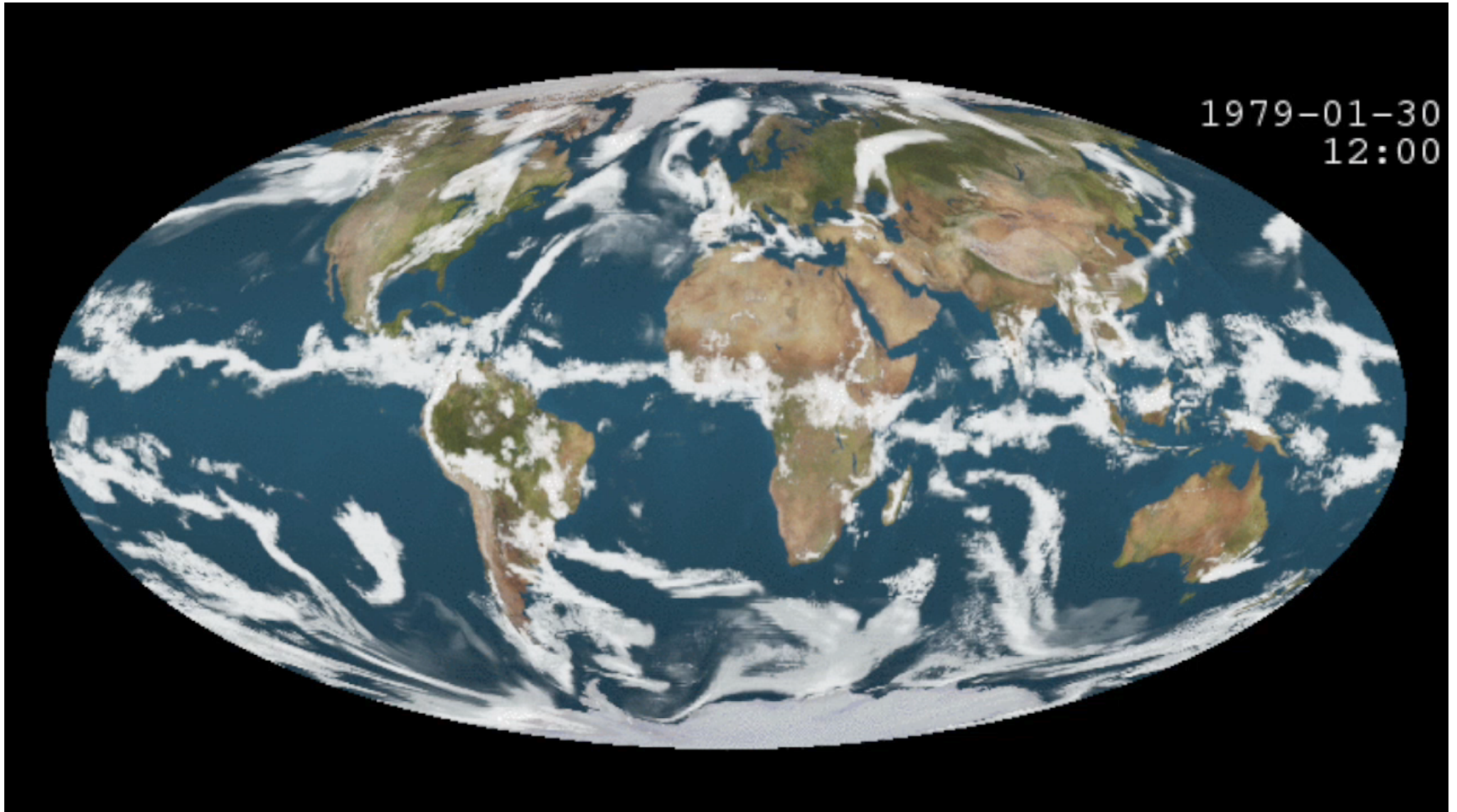
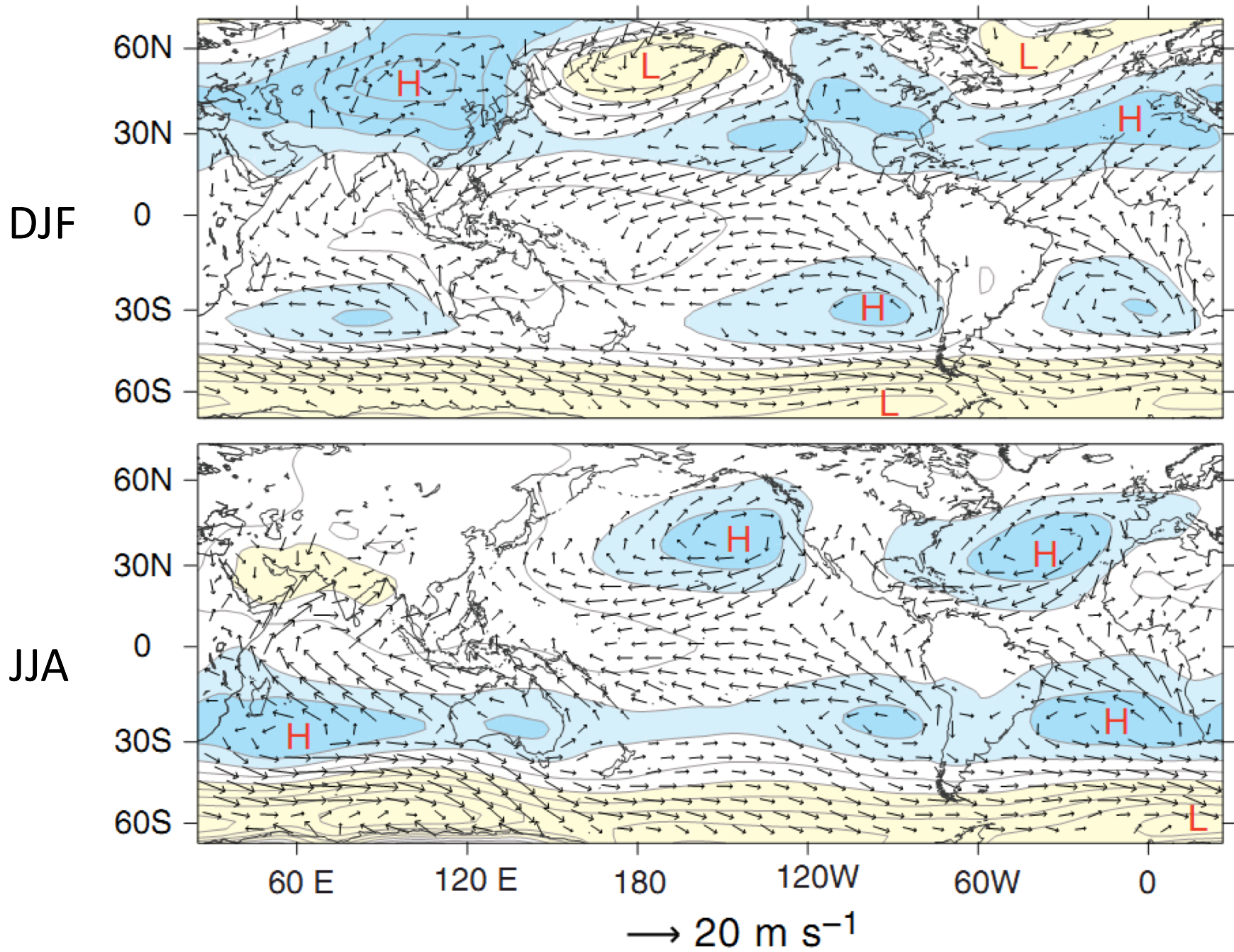


Précipitations simulées – hiver Hem. Nord



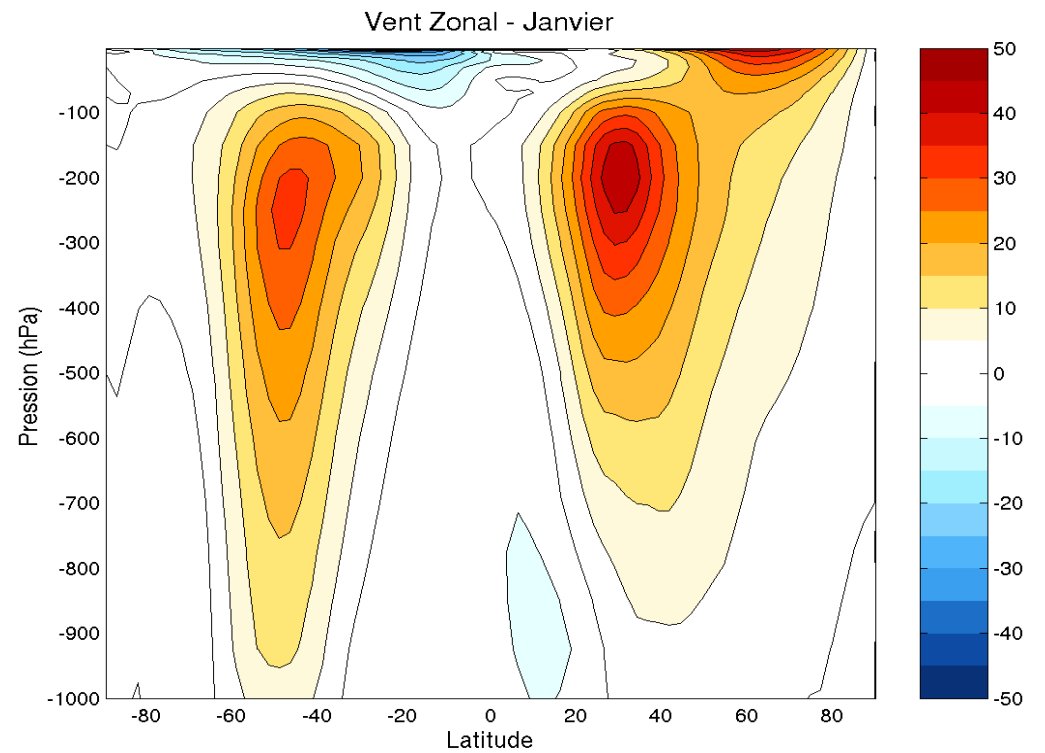
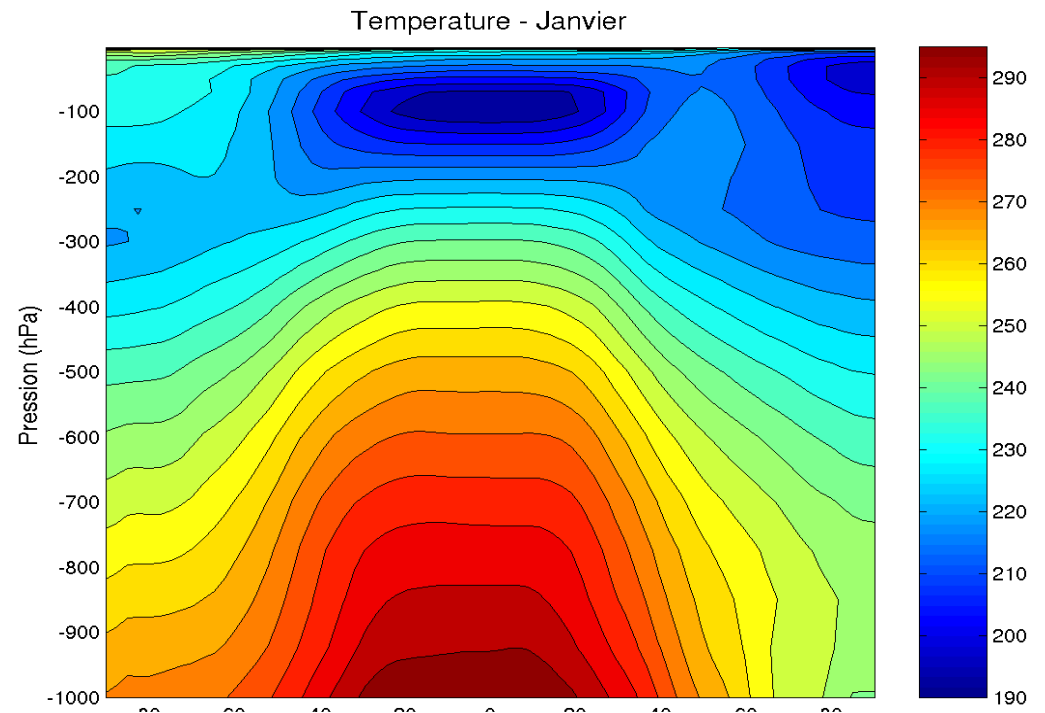
Vents de surface et pression au niveau de la mer



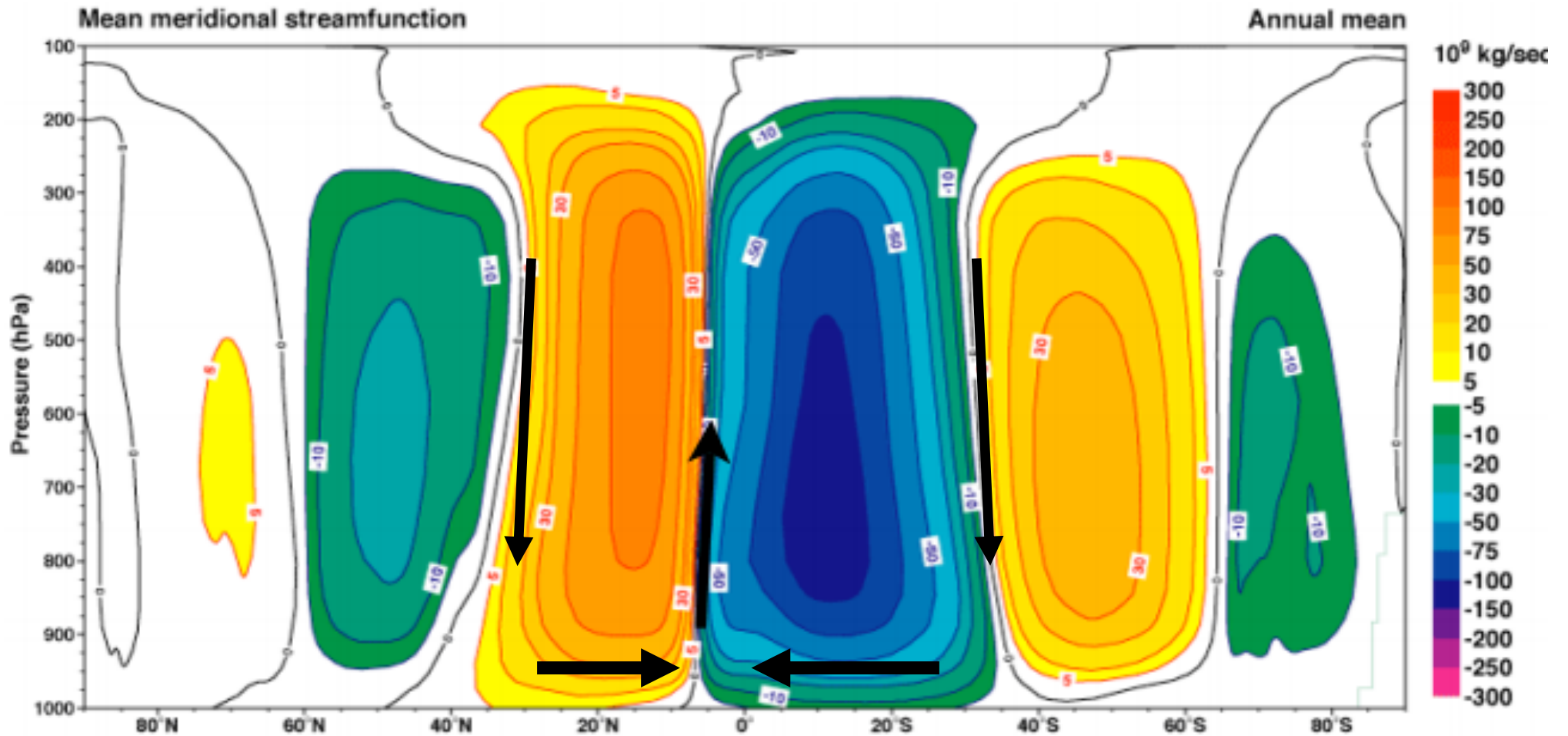
Température

Coupe latitude/hauteur
Janvier

Vent zonal
(ouest-est)



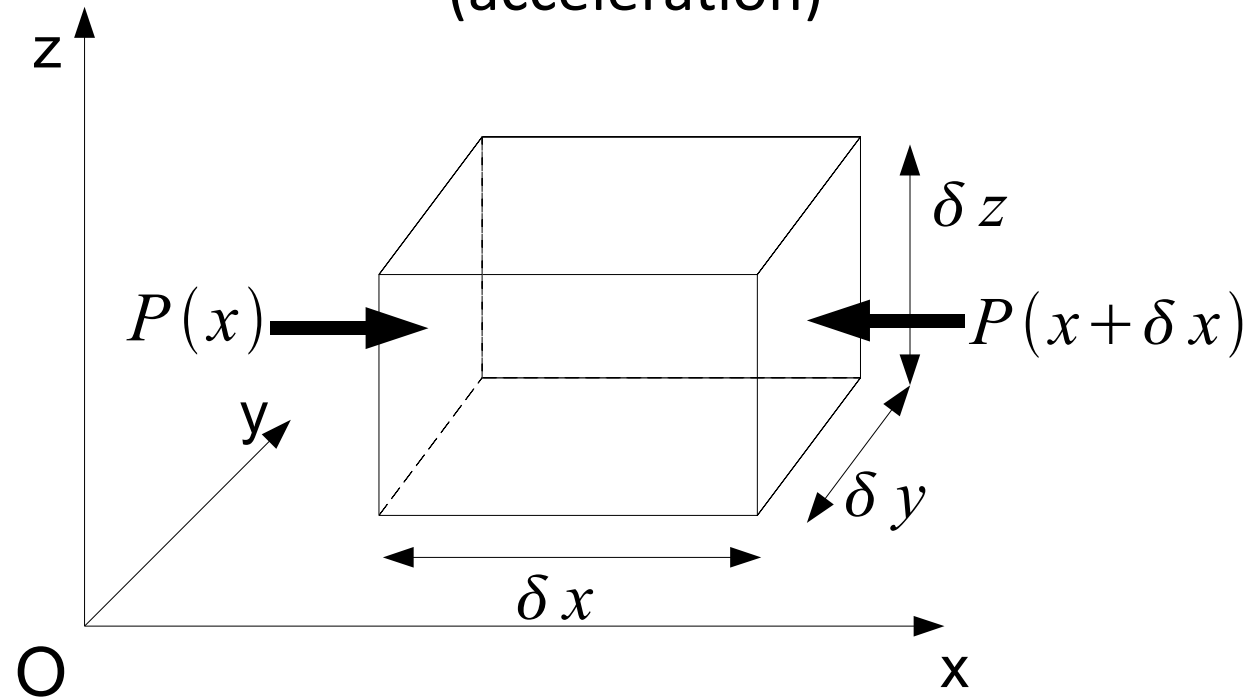
Circulation méridienne (en moyenne zonale):
Cellules de Hadley



Fonction de courant méridienne

Force de pression horizontale

(accélération)



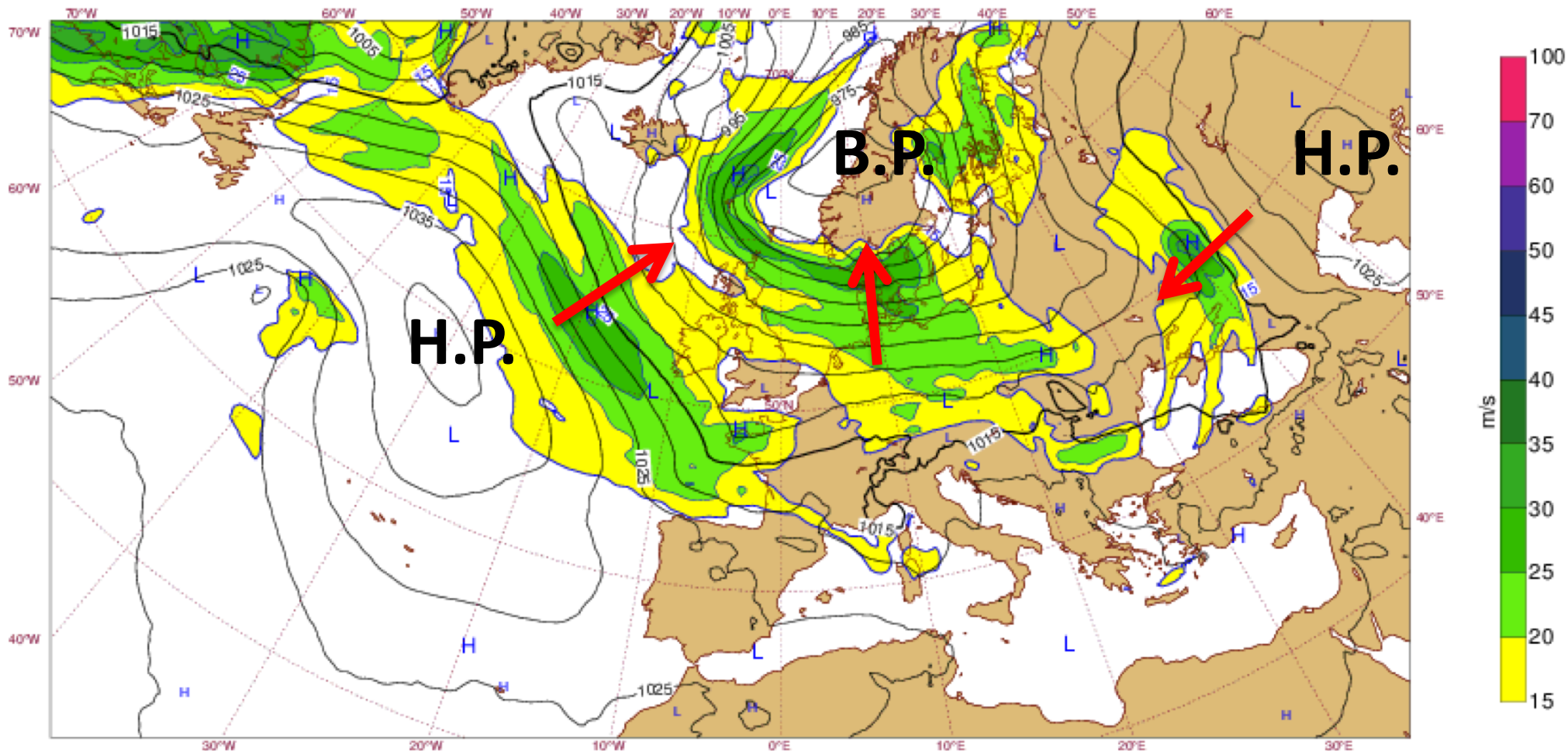
$$F_p^x = -\frac{1}{\rho} \frac{P(x) - P(x + \delta x)}{\delta x}$$

$$\vec{F}_p = -\frac{1}{\rho} \vec{\text{grad}}_z P$$

- Des hautes vers les basses pressions
- Proportionnelle aux variations de pression (gradient)

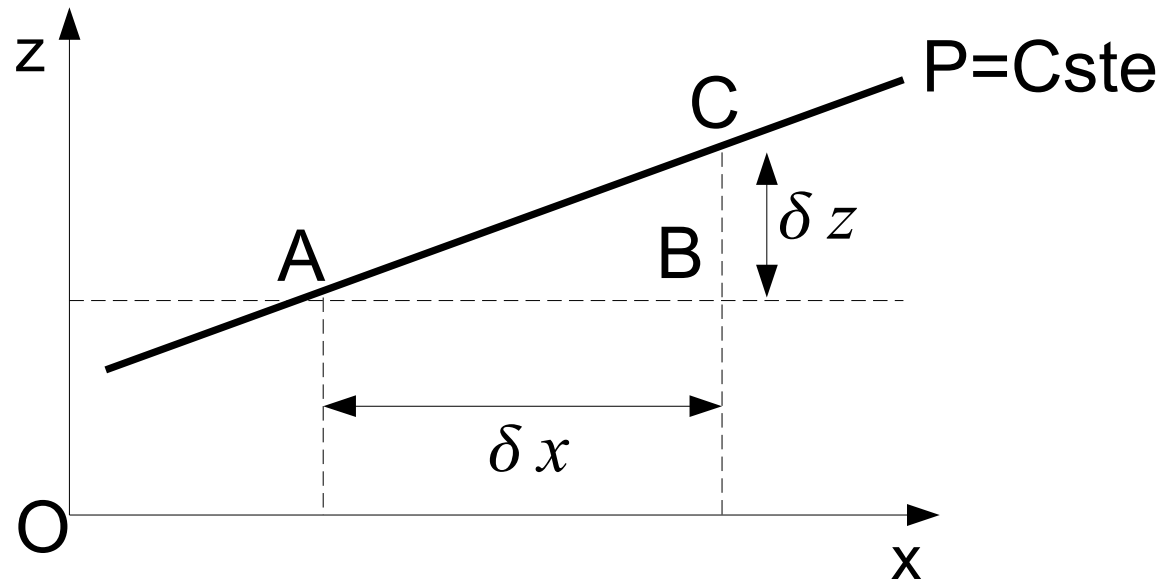
Pression au niveau de la mer : 12 Jan 2017

Monday 09 January 2017 1200 UTC ECMWF t+72 VT: Thursday 12 January 2017 1200 UTC
Surface: Mean sea level pressure / 850hPa wind speed



Contours 5 hPa  force de pression

Expression en pente de la surface isobare



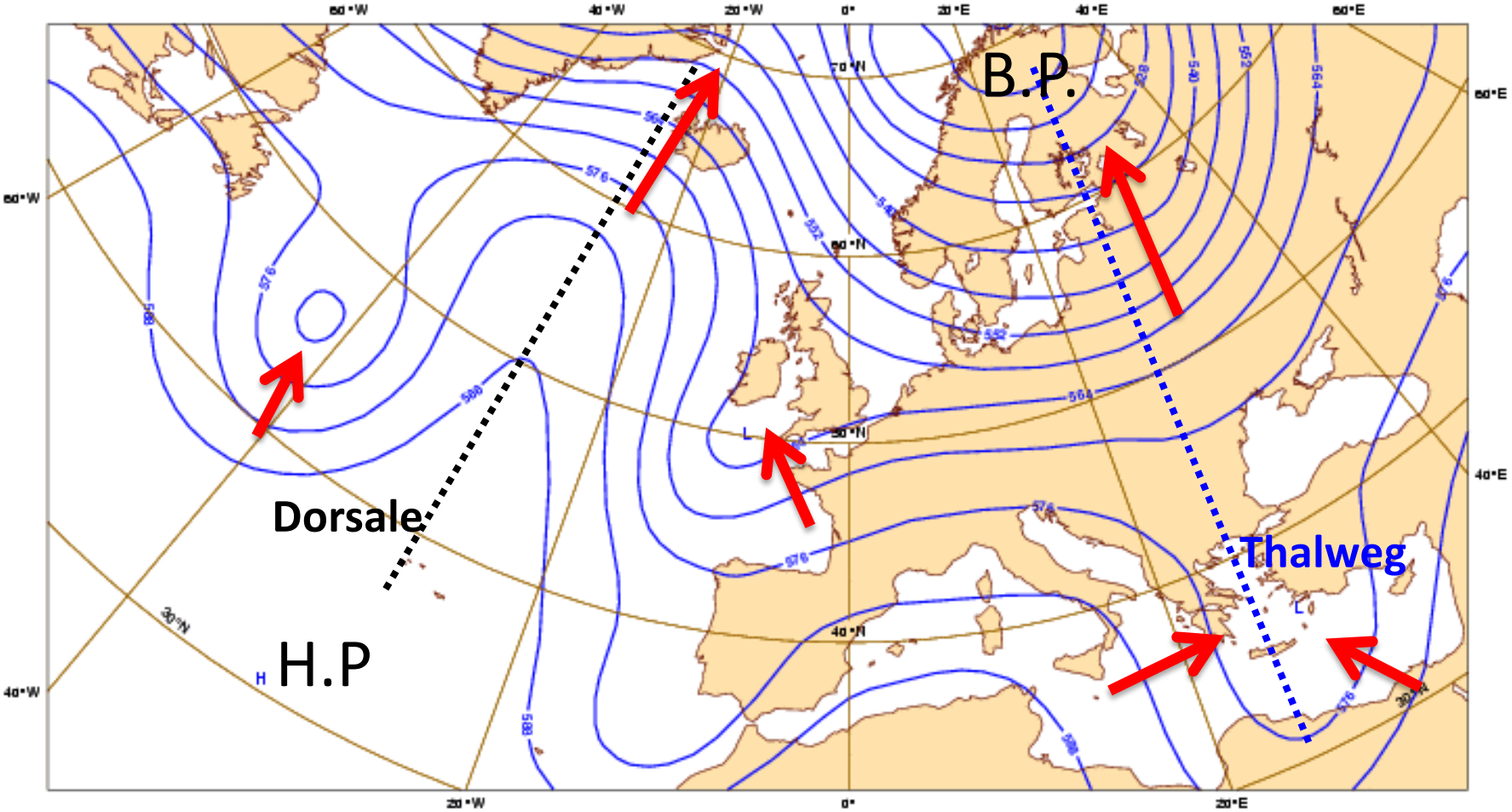
$$F_p^x = -\frac{1}{\rho} \frac{P_B - P_A}{\delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{P_B - P_C}{\delta z} \frac{\delta z}{\delta x} = g \text{ (eq. hydrost.)}$$

$$\vec{F}_p = -g \overrightarrow{\text{grad}}_p Z$$

- Équilibre hydrostatique : la pression augmente vers le bas
- Force de pression horizontale \propto pente de la surface isobare
- La densité disparaît de l'expression

Altitude de la surface 500hPa (isohypse)

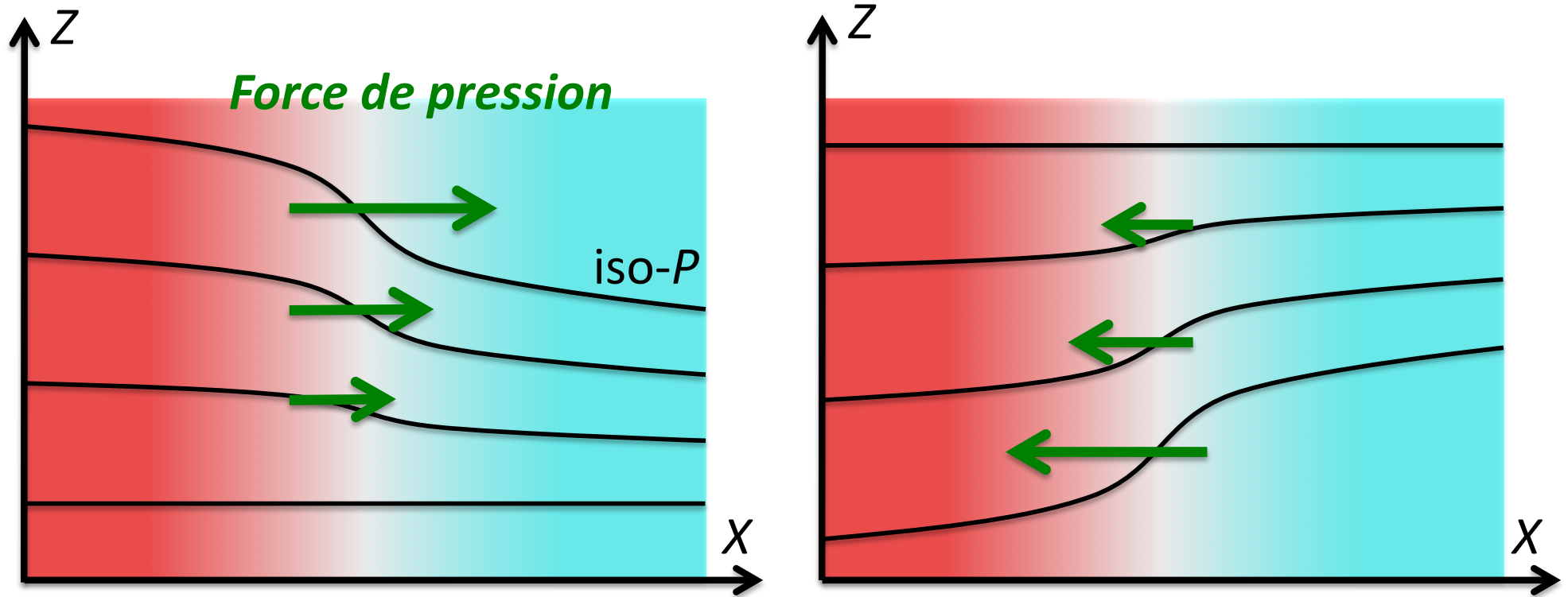
Tuesday 13 September 2005 12UTC ©ECMWF Forecast t+072 VT: Friday 16 September 2005 12UTC
500 hPa Height



Contours 40 m

Impact des variations de température

$$\vec{F}_p = -g \overrightarrow{\text{grad}}_p Z$$



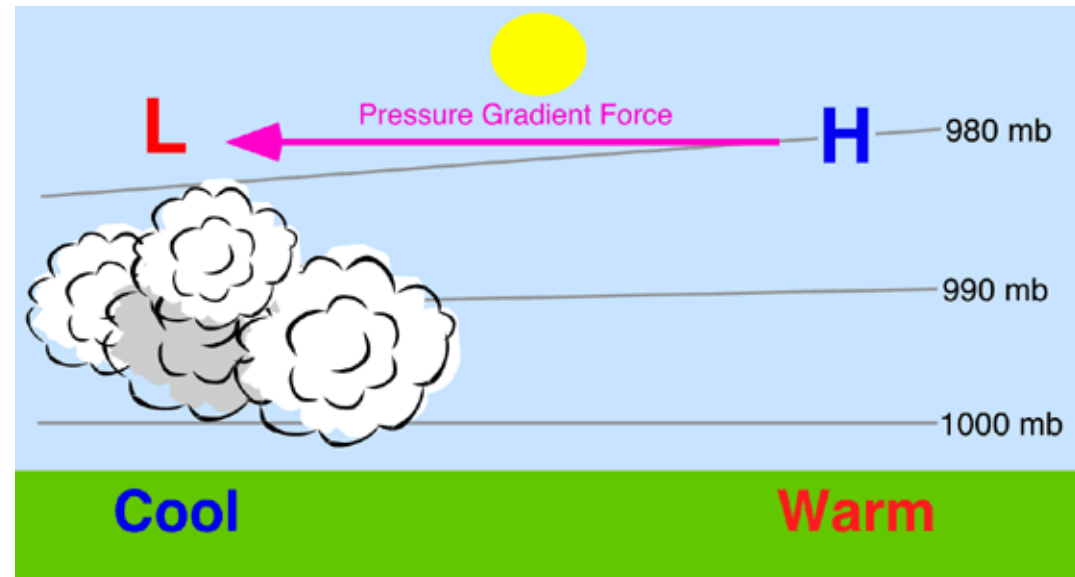
Variation horizontales de la température

- Variation verticale des forces de pression
- Besoin d'une référence pour connaître la valeur partout

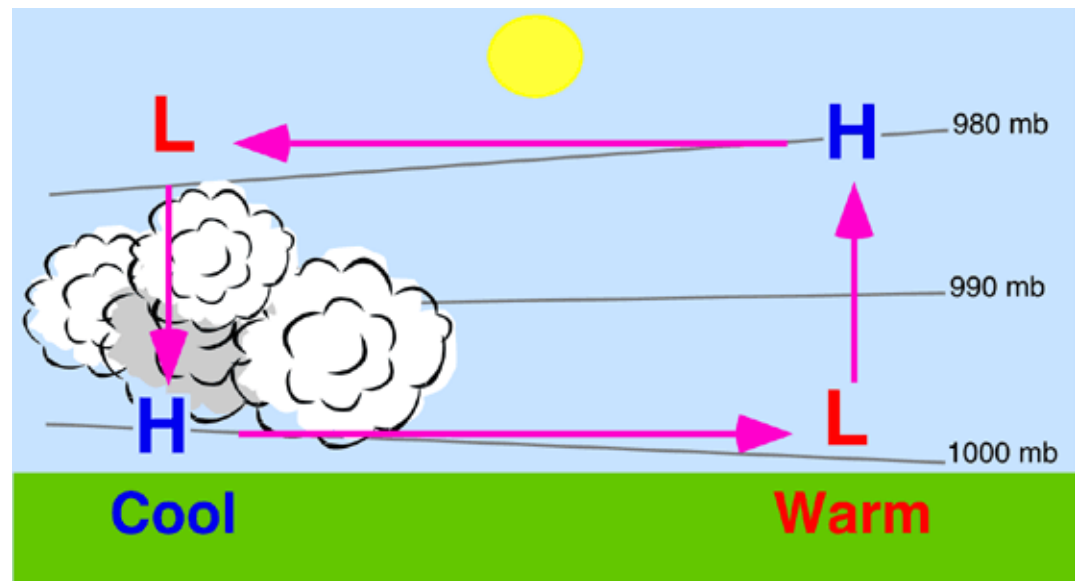
Circulations thermiques directes

1. Air chaud : pression plus élevée au dessus

Développement d'une « circulation de brise »



2. Mouvement d'air vers les basses pressions: développement d'anomalies en surface.

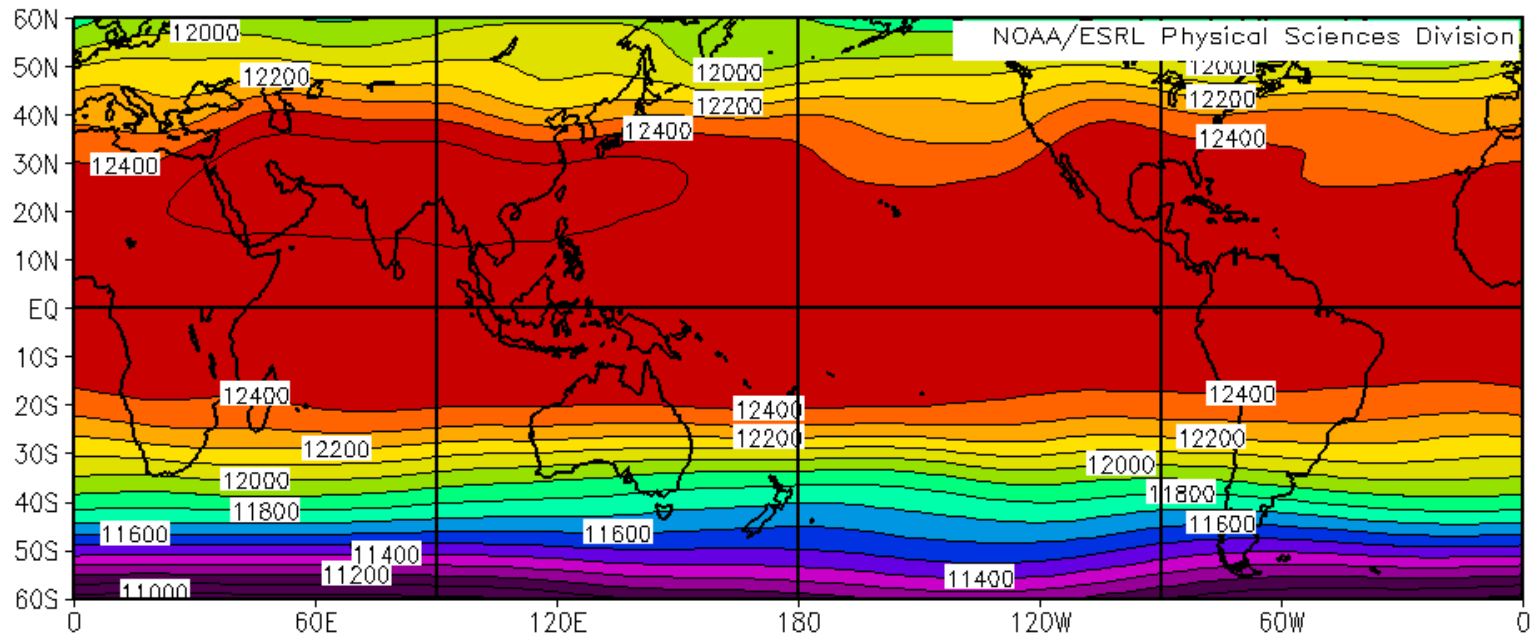


➤ Air chaud : basse pression en surface, haute pression en altitude

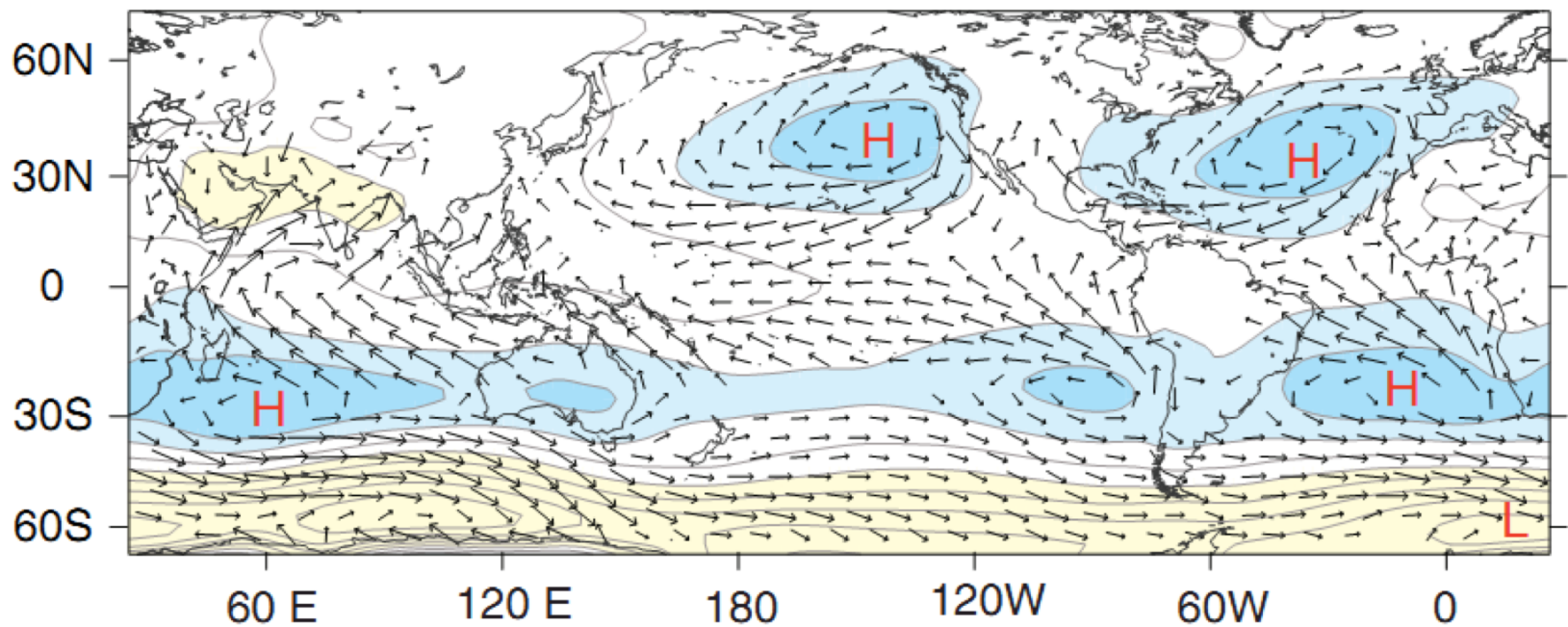
Observé aussi à grande échelle
(contrastes continent / océan, moussons)

Altitude à
200 hPa

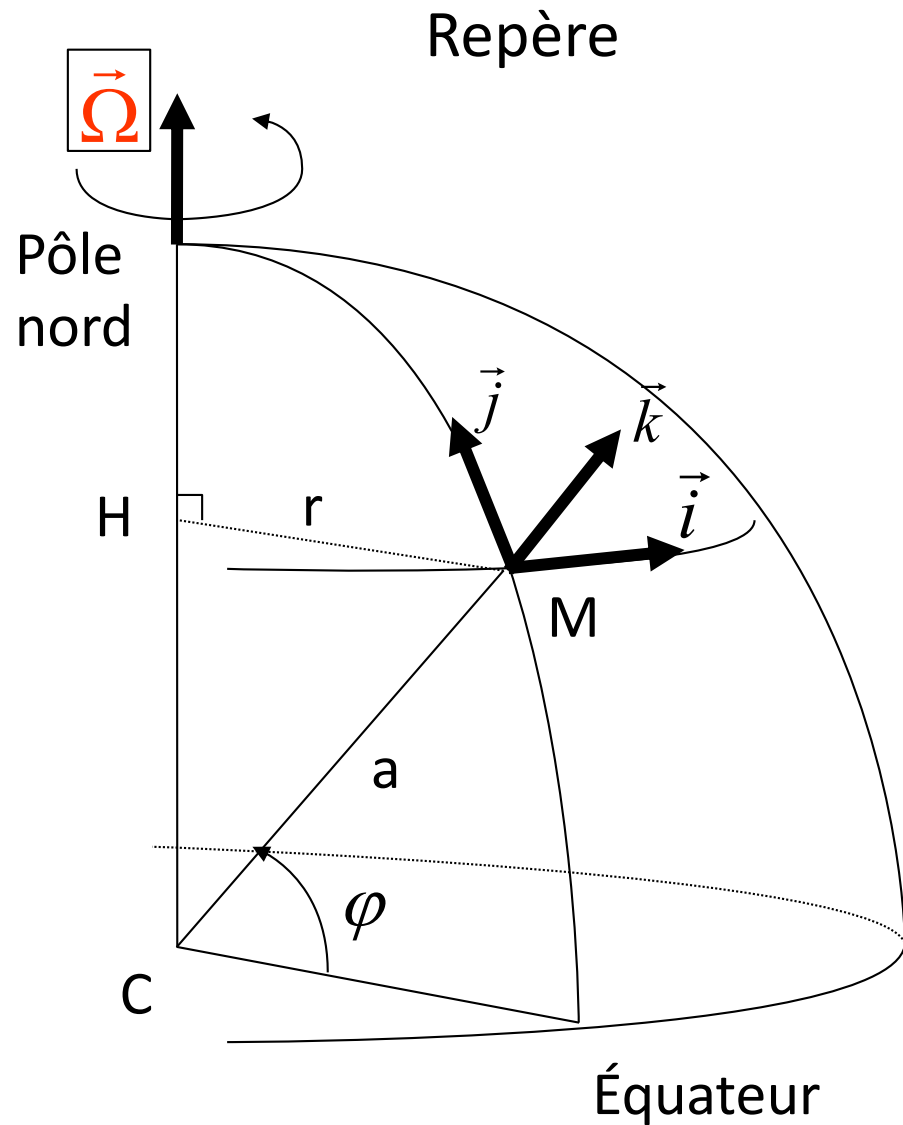
Été (JJA)



Pression
niveau de
la mer



Rôle de la rotation de la Terre



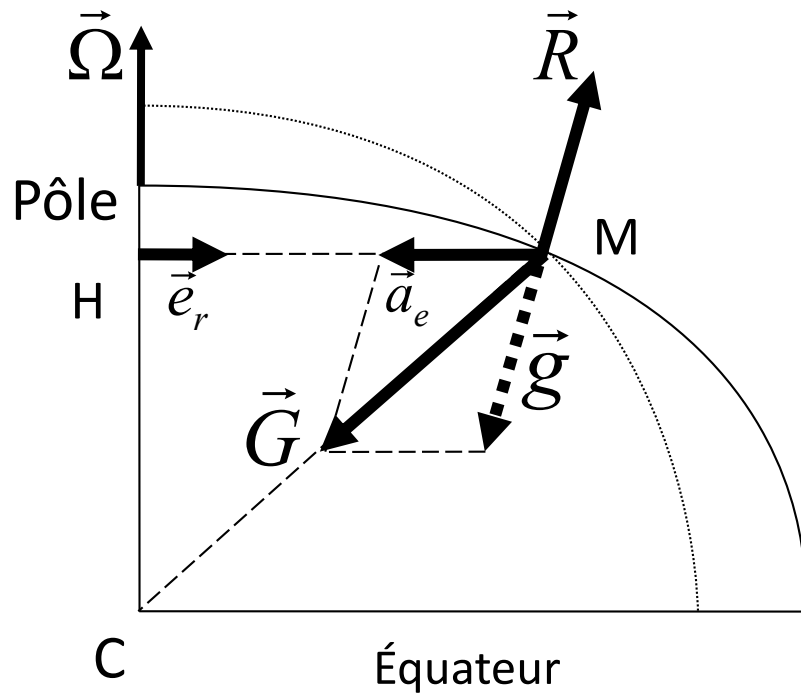
Vitesse, accélération

- *Relatives:*
Par rapport à la surface.
Composantes (u, v, w)
- *D'entraînement:*
D'un point immobile / surface

$$\vec{v}_e = \Omega r \vec{i}$$

$$\vec{a}_e = -\Omega^2 \overline{HM}$$

Équilibre d'un point posé sur le sol



Relation fondamentale:

$$m\vec{G} + \vec{R} = m\vec{a}_e$$

$$\vec{a}_e = -\Omega^2 \overline{HM}$$

On définit une *pesanteur*
(gravité apparente):

$$\vec{g} = \vec{G} + \Omega^2 \overline{HM}$$

alors

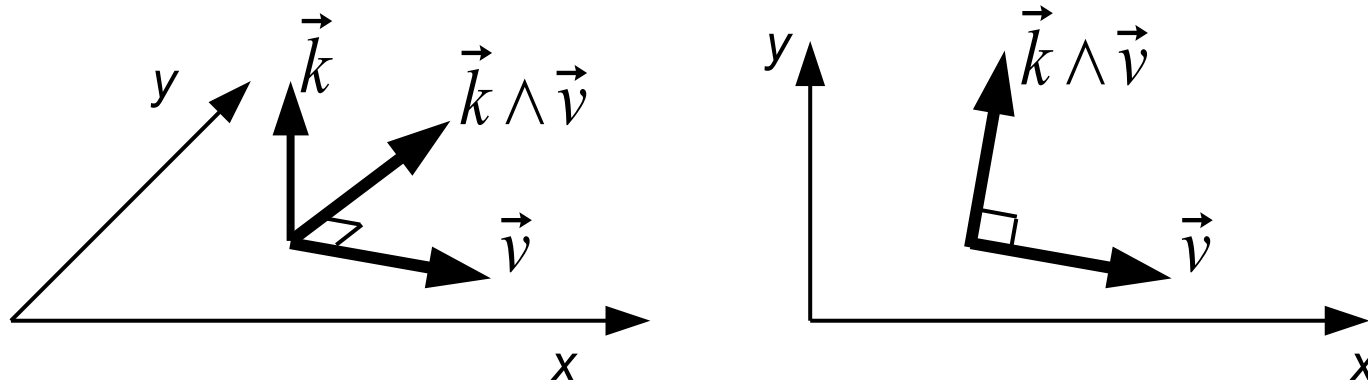
$$m\vec{g} + \vec{R} = \vec{0}$$

Force de Coriolis

Force apparente due à la rotation de la Terre, quand vitesse relative non nulle.

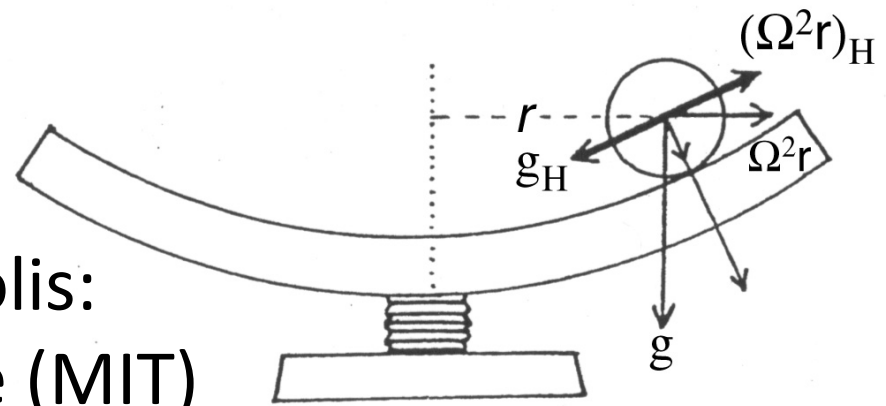
$$\vec{F}_C = -f \vec{k} \times \vec{v}, \quad f = 2\Omega \sin\varphi$$

- Ω vitesse angulaire de rotation ($2\pi/\text{jour}$),
- φ latitude
- f « facteur de Coriolis »



- Orthogonale au vent (à droite dans l'hémisphère nord):
 - Peut changer la direction du vent / courant, pas sa norme

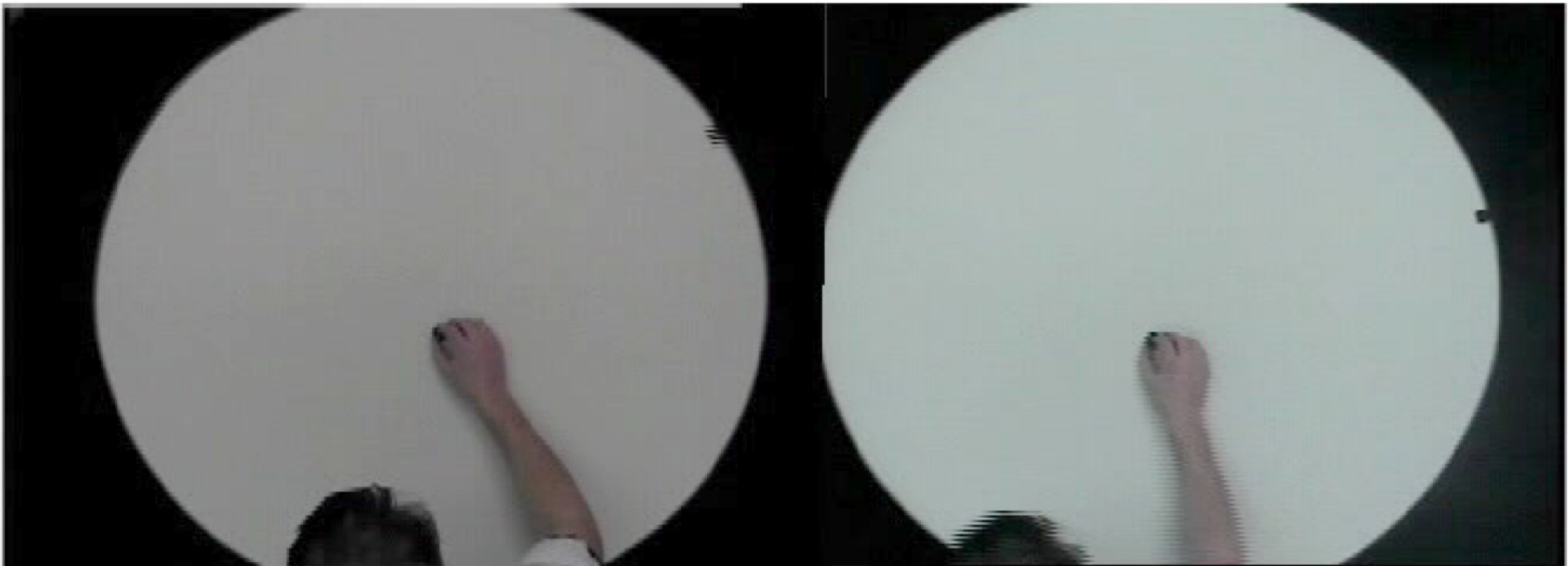
Exemple de la force de Coriolis:
Table parabolique tournante (MIT)



Un mobile fait des aller-retour en glissant sur la table tournante

Caméra fixe
(attachée au plafond)

Camera tournant
Avec la table

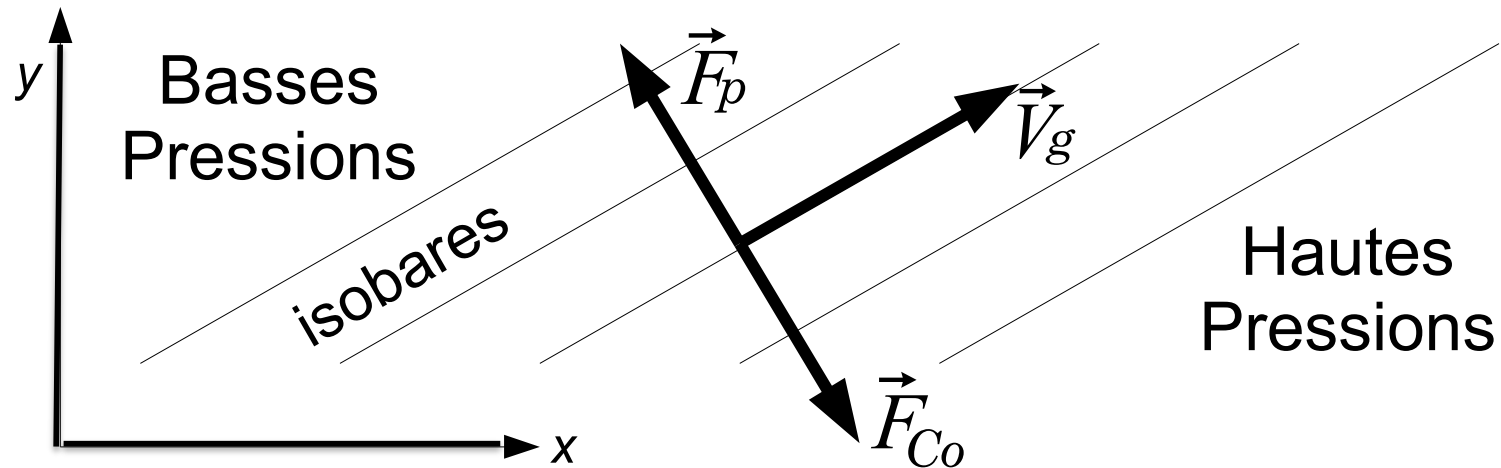


Équilibre géostrophique

Équilibre entre forces de pression et de Coriolis

Vent géostrophique : satisfait exactement cet équilibre

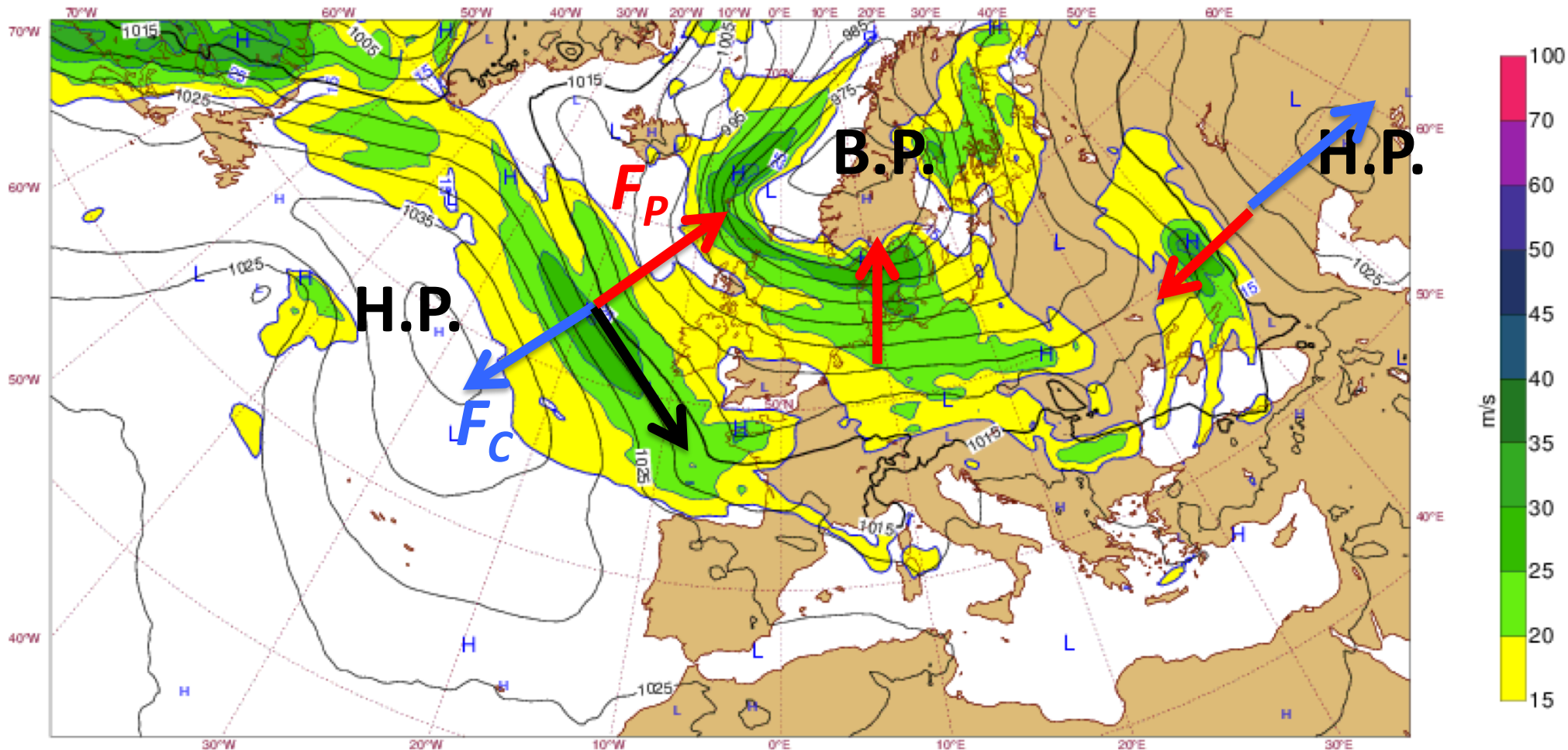
$$\vec{v}_g = \frac{g}{f} \vec{k} \times \overrightarrow{\text{grad}}_p Z = \frac{1}{\rho f} \vec{k} \times \overrightarrow{\text{grad}}_z p$$



- Vent géostrophique parallèle aux isobares
- Basses pressions / altitudes à gauche (hémisphère nord)
- Vitesse \propto Force de pression

Pression au niveau de la mer : 12 Jan 2017

Monday 09 January 2017 1200 UTC ECMWF t+72 VT: Thursday 12 January 2017 1200 UTC
Surface: Mean sea level pressure / 850hPa wind speed



Force de pression



force de Coriolis

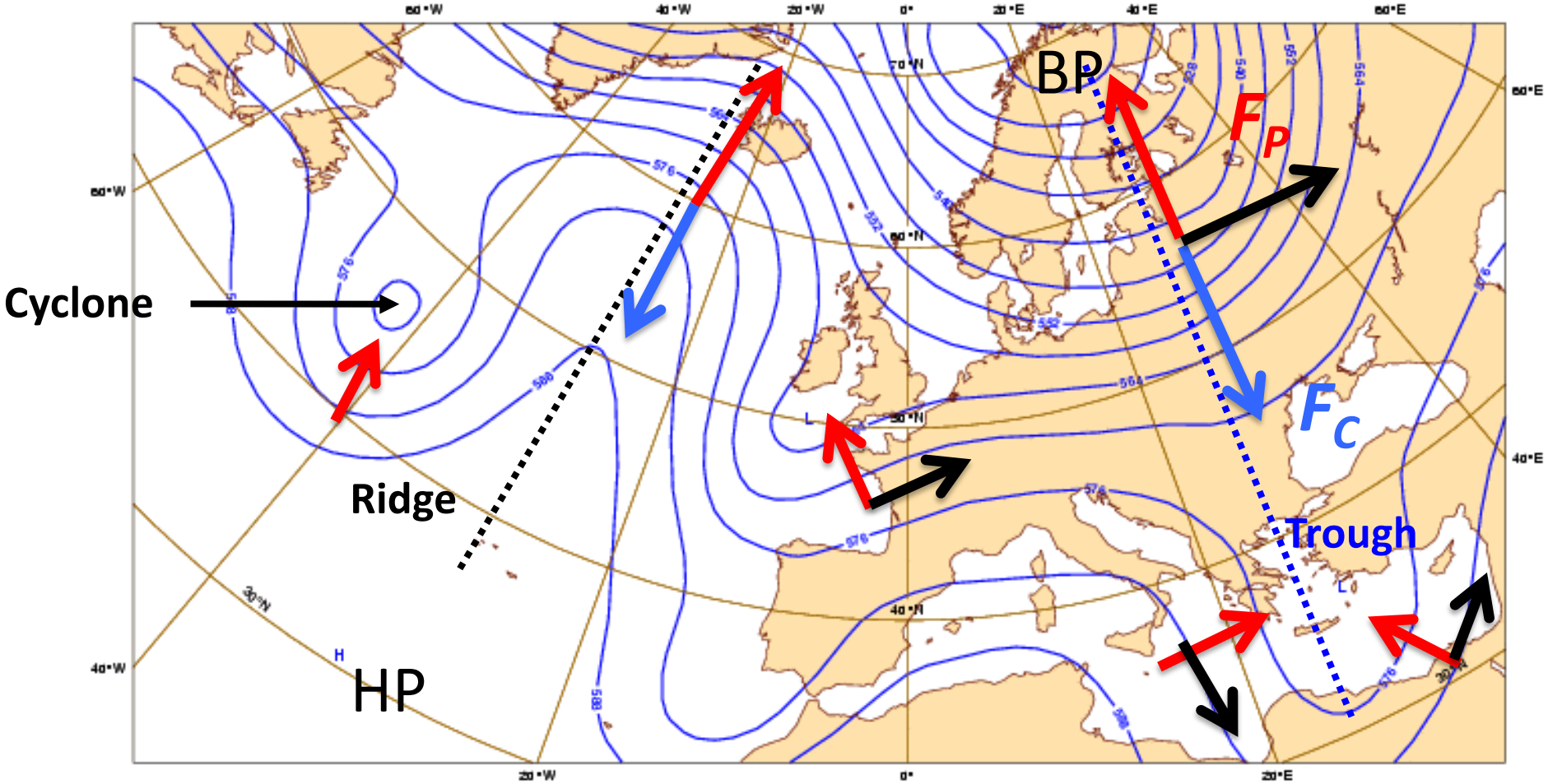


Vent



Altitude de la surface 500hPa (isohypse)

Tuesday 13 September 2005 12UTC ©ECMWF Forecast t+072 VT: Friday 16 September 2005 12UTC
500 hPa Height



Force de pression

force de Coriolis

Vent

Validité de l'équilibre géostrophique

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + f\vec{k} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}} p$$

Accél. Relative

$$U^2/L$$

Coriolis

$$fU$$

Pression

$$\delta P/\rho L$$

Échelles caractéristiques :

Vitesse U

anomalie pression $\delta P/\rho$

Longueur L

factor de Coriolis f

Rapport (acceleration)/(Coriolis) : *nombre de Rossby* $Ro = U/fL$

➤ Équilibre géostrophique si $Ro \ll 1$

Validité de l'équilibre géostrophique

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + f\vec{k} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}} p$$

Accél. relative

$$U^2/L$$

$$10^{-4}$$

Coriolis

$$fU$$

$$10^{-3}$$

Pression

$$\delta P/\rho L$$

$$10^{-3}$$

Perturbation latitudes moyennes : $Ro = 0.1$

$$U = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$f = 10^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ (45° lat)}$$

$$L = 1000 \text{ km}$$

$$\delta P/\rho = 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \text{ (or } \delta P = 10 \text{ hPa)}$$

➤ Aux latitudes moyennes, équilibre géostrophique pour $L > 1000 \text{ km}$

Validité de l'équilibre géostrophique

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + f\vec{k} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}} p$$

Accél. relative

Coriolis

Pression

$$U^2/L$$

$$fU$$

$$\delta P/\rho L$$

$$10^{-4}$$

$$10^{-4}$$

$$10^{-4}$$

Tropiques, échelle synoptique ($L=1000$ km) : $Ro = 1$

$$U = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

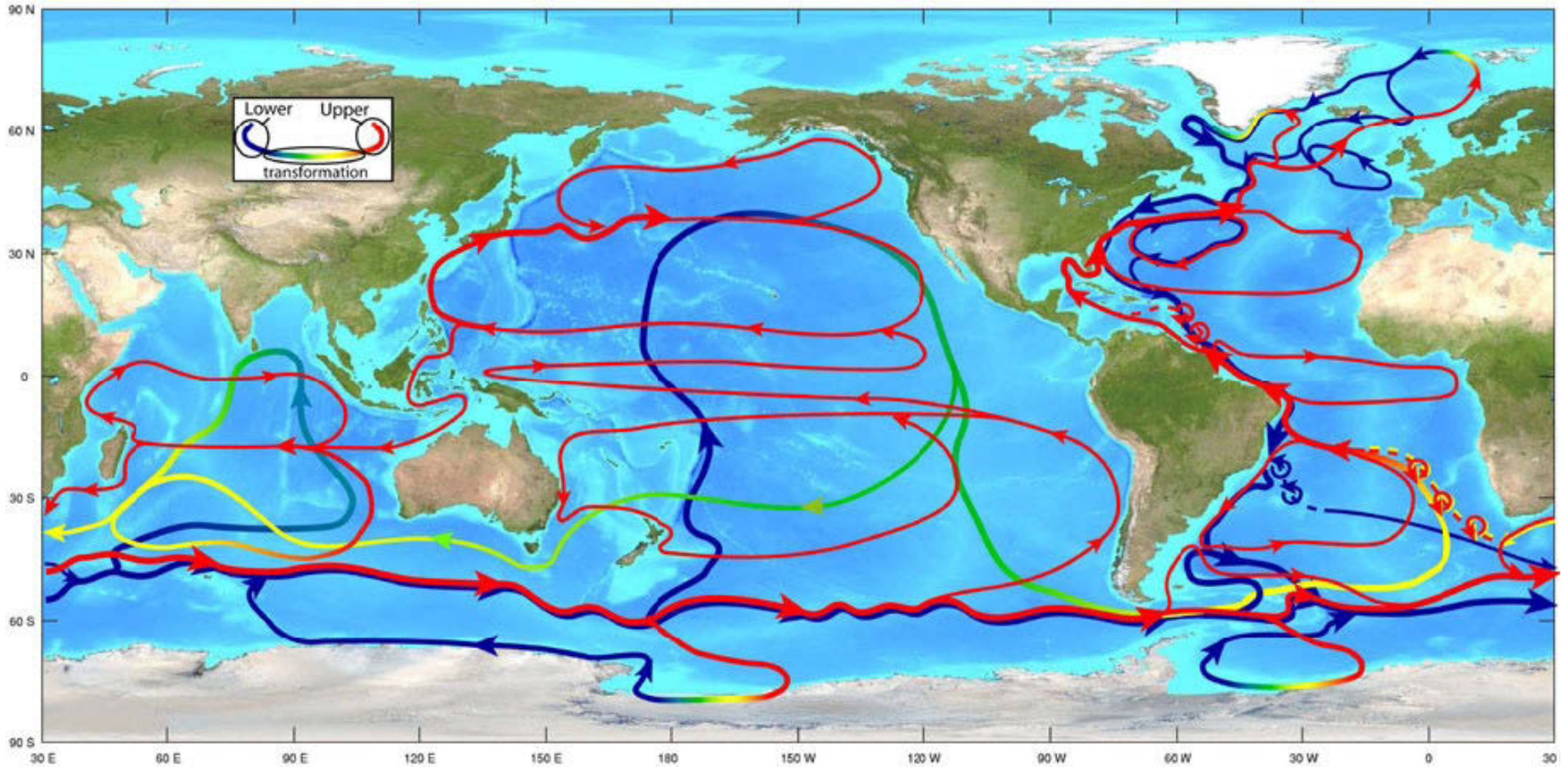
$$f = 10^{-5} \text{ s}^{-1} (5^\circ \text{ lat})$$

$$L = 1000 \text{ km}$$

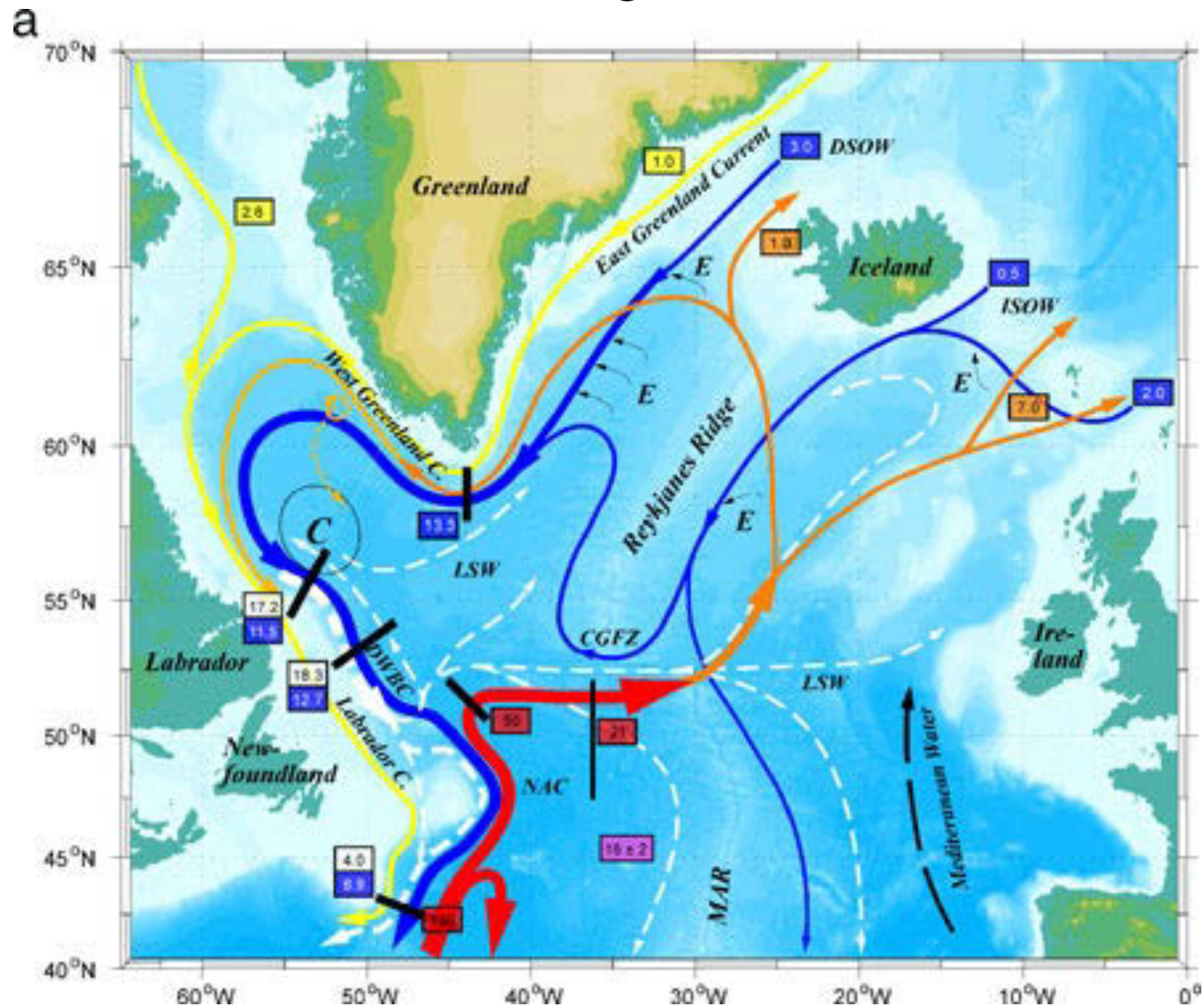
$$\delta P/\rho = 10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \text{ (or } \delta P = 1 \text{ hPa)}$$

- Faibles anomalies de pression dans les tropiques
- Équilibre géost. seulement à l'échelle planétaire $L = 10\,000$ km

Circulation 3D moyenne (bleu = plus dense et plus profond)



Échelle régionale...



Nombre de Rossby dans l'océan très petit

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + f\vec{k} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p$$

Accél. relative

$$U^2/L$$

Coriolis

$$fU$$

Pression

$$\delta P/\rho L$$

Tourbillon: $Ro = U/fL = 0.1$

$$U = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad f = 10^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ (45° lat)}$$

$$L = 100 \text{ km}$$

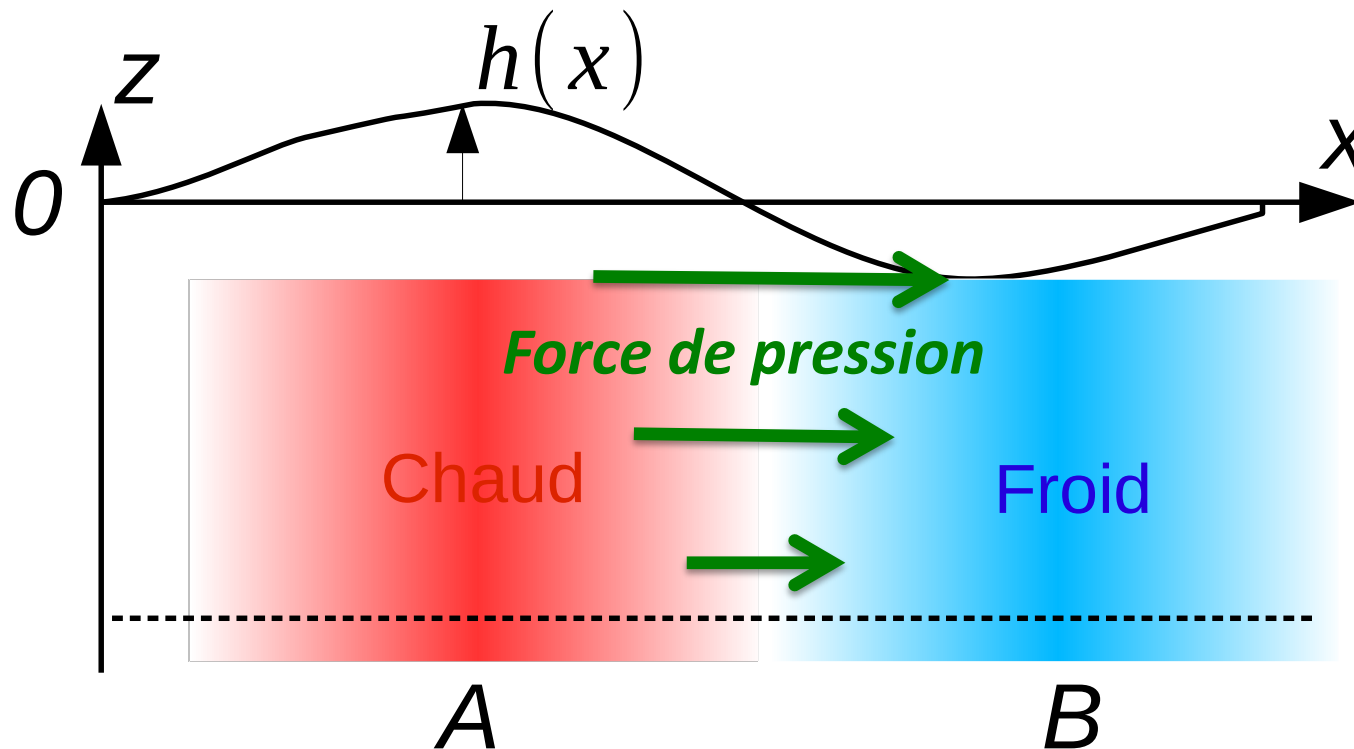
Gyre: $Ro = U/fL = 0.001$

$$U = 1\text{-}10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} \quad f = 10^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ (45° lat)}$$

$$L = 1\text{-}10 \text{ 000 km}$$

Forces de pression horizontales

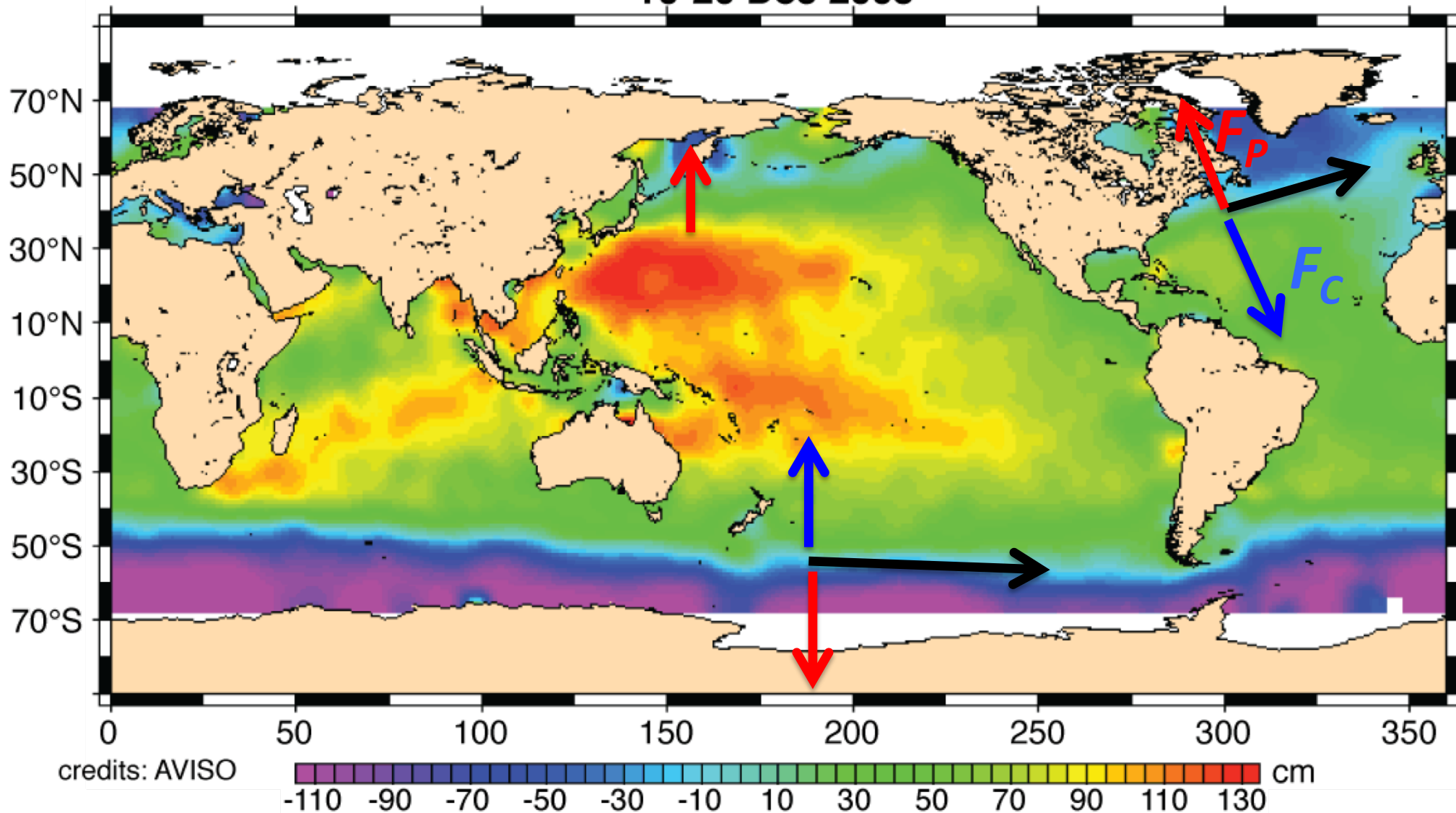
$$\vec{F}_p = -\frac{1}{\rho_0} \overrightarrow{\text{grad}} p = -g \overrightarrow{\text{grad}} h - \frac{g}{\rho_0} \int_z^0 \overrightarrow{\text{grad}} \rho dz$$



1. Courants de surface forcés par hauteur dynamique
2. En profondeur, rôle des variations de densité intégrées.

Hauteur dynamique de la mer (cm)

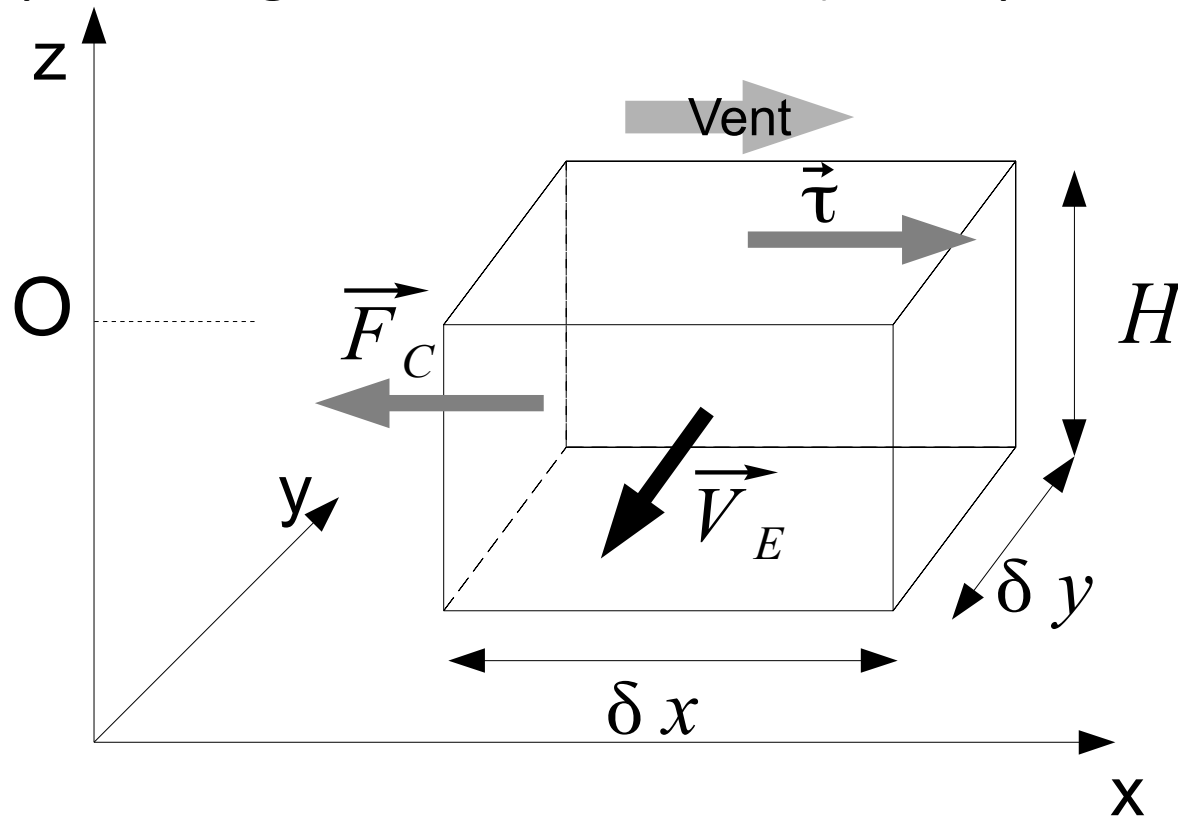
Absolute Dynamic Topography from TOPEX/POSEIDON
10-20 Dec 2003



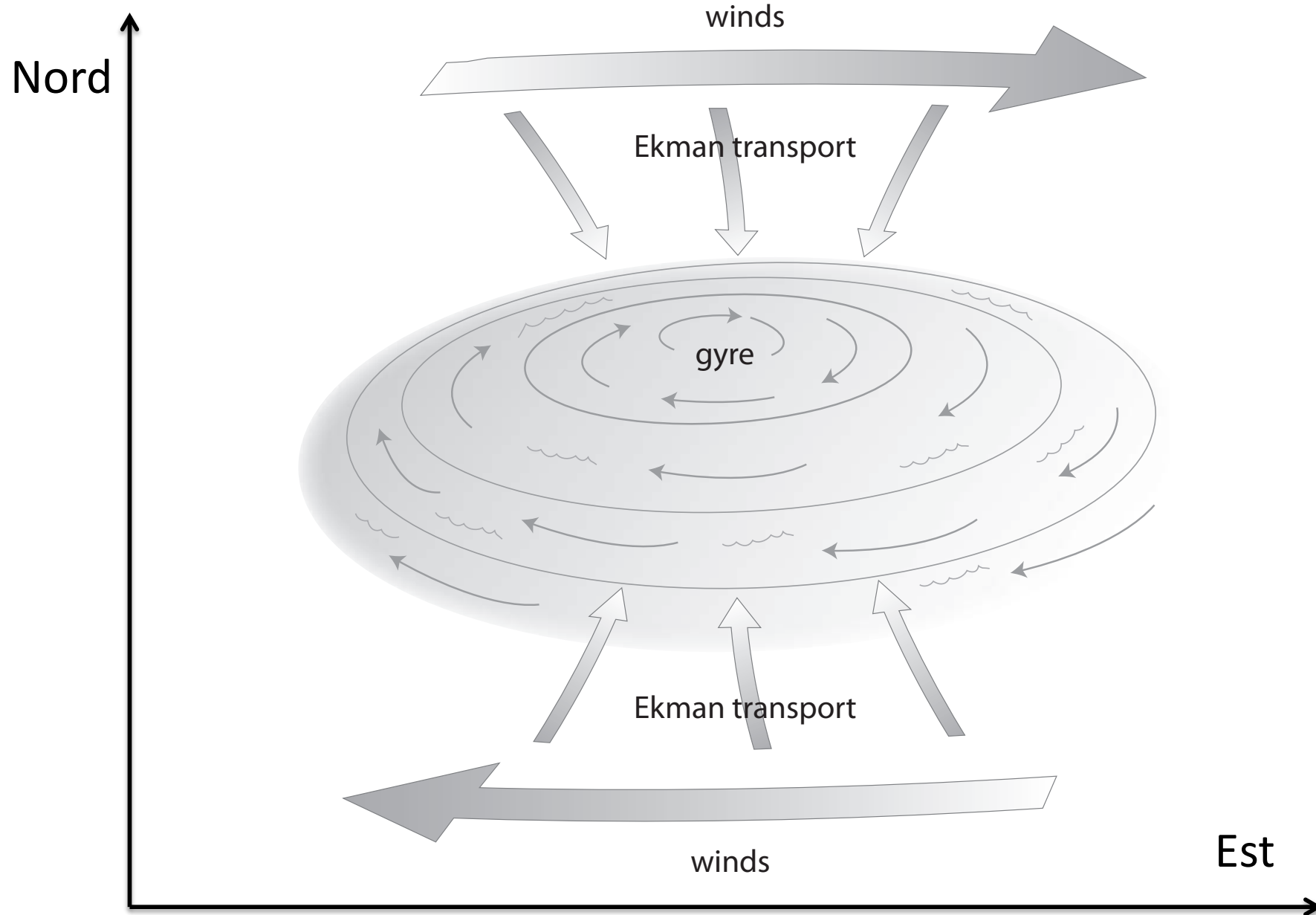
Transport d'Ekman

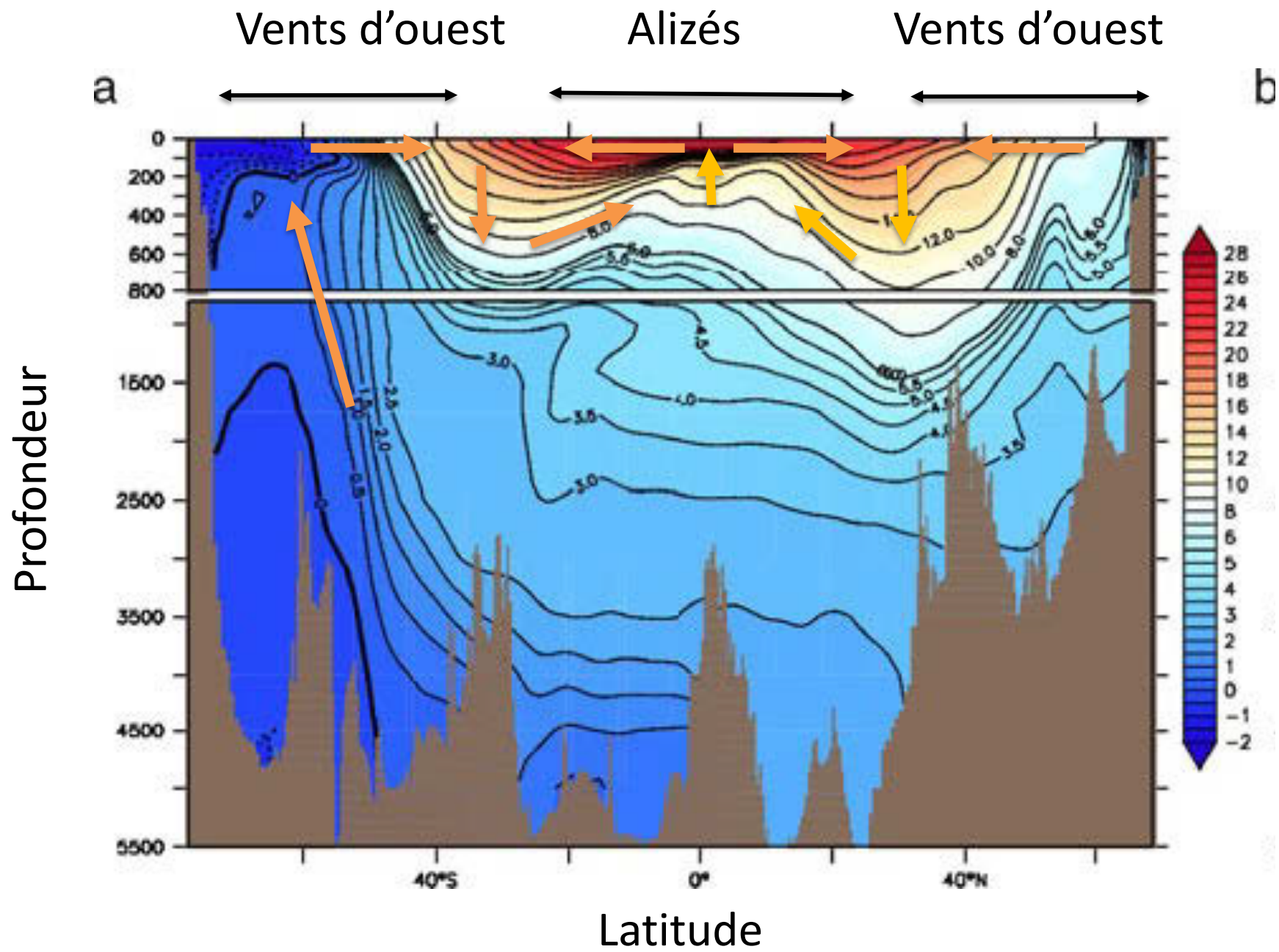
$$\vec{V}_E = -\frac{1}{f} \vec{k} \wedge \vec{\tau}$$

- Courants forcés *directement* par le vent dans la couche de surface
- Équilibre tension de vent / force de Coriolis
- Transport intégré à droite de vent (hémisphère nord)



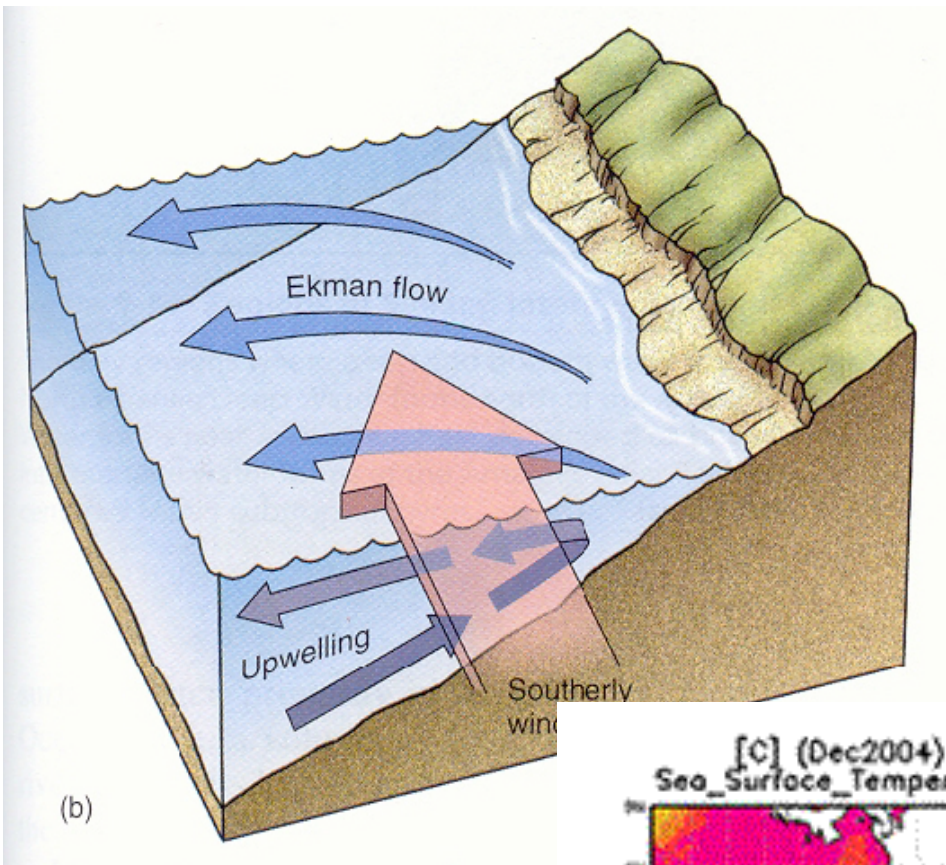
Circulation géostrophique forcée indirectement par le vent : gyres



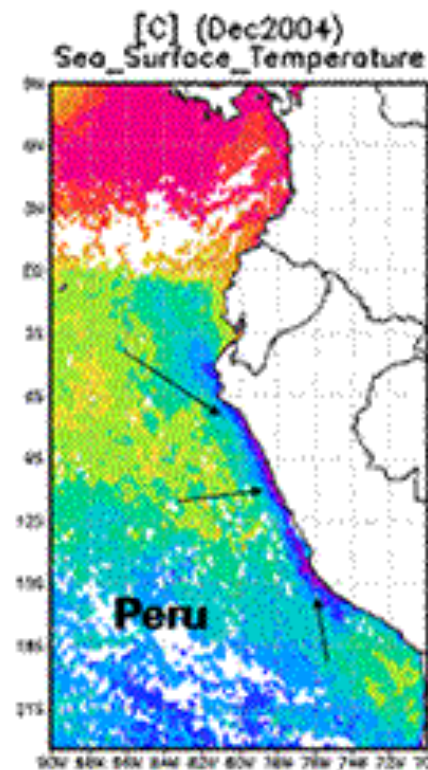


Transport d'Ekman: upwelling côtier (Pérou)

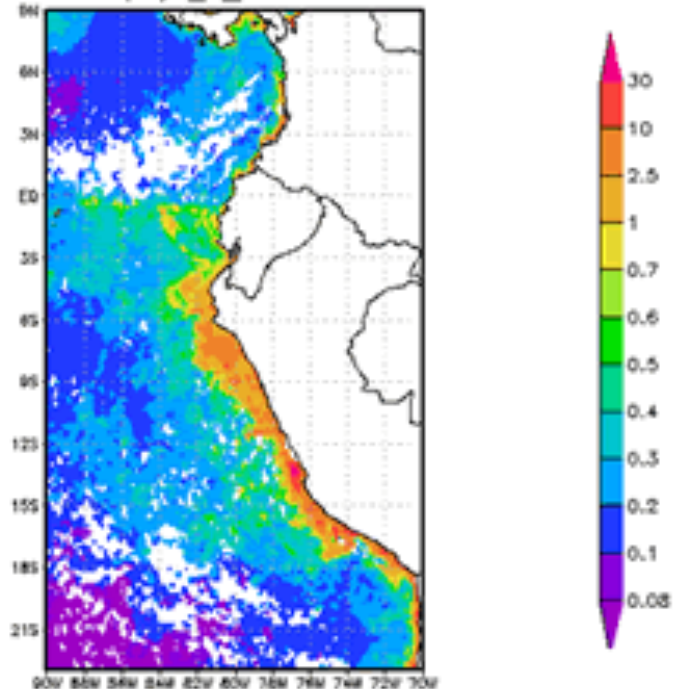
Température de surface,
Concentration en Chlorophylle
(satellite)



(b)

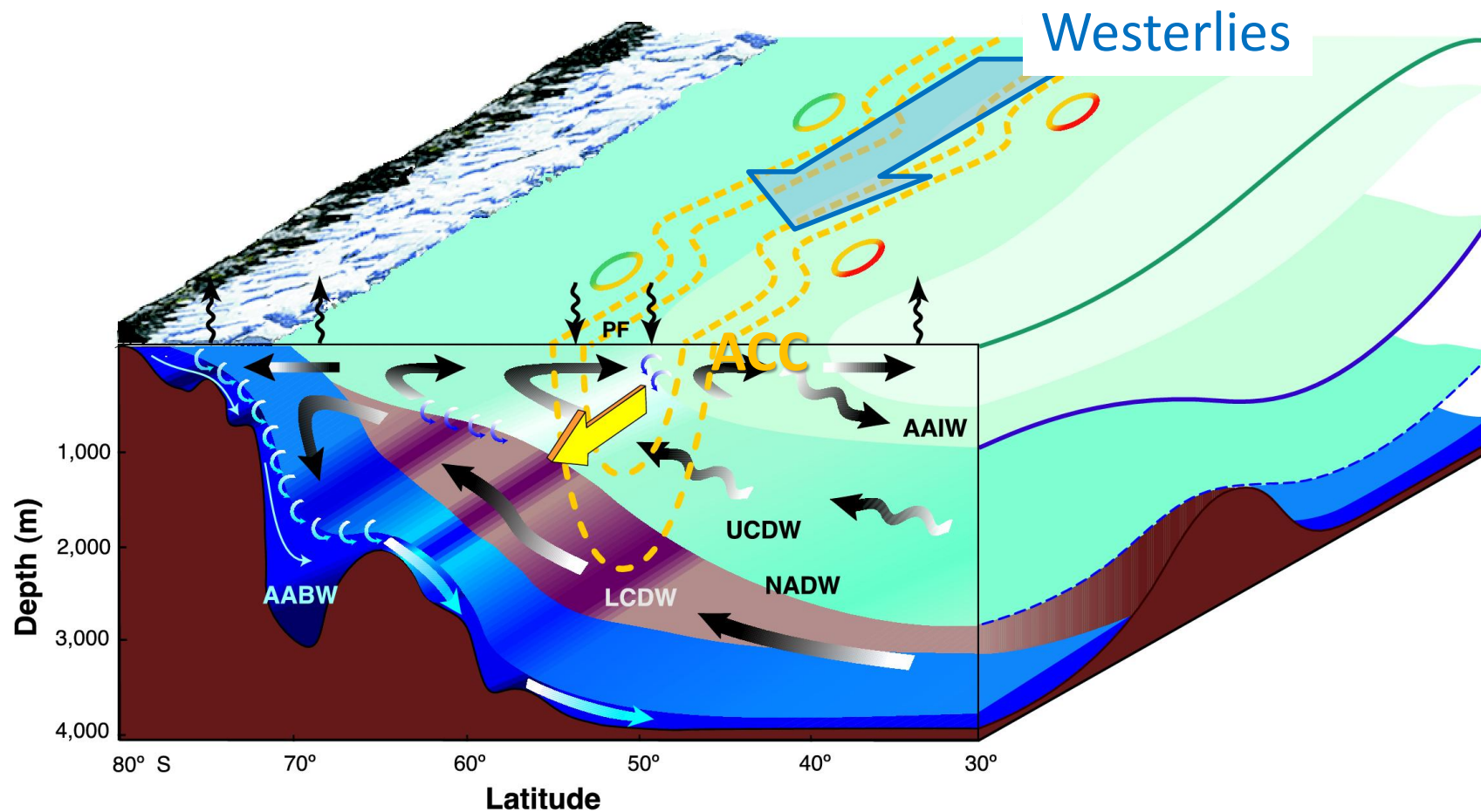


[mg/m³] (Dec2004)
Chlorophyll_a_concentration



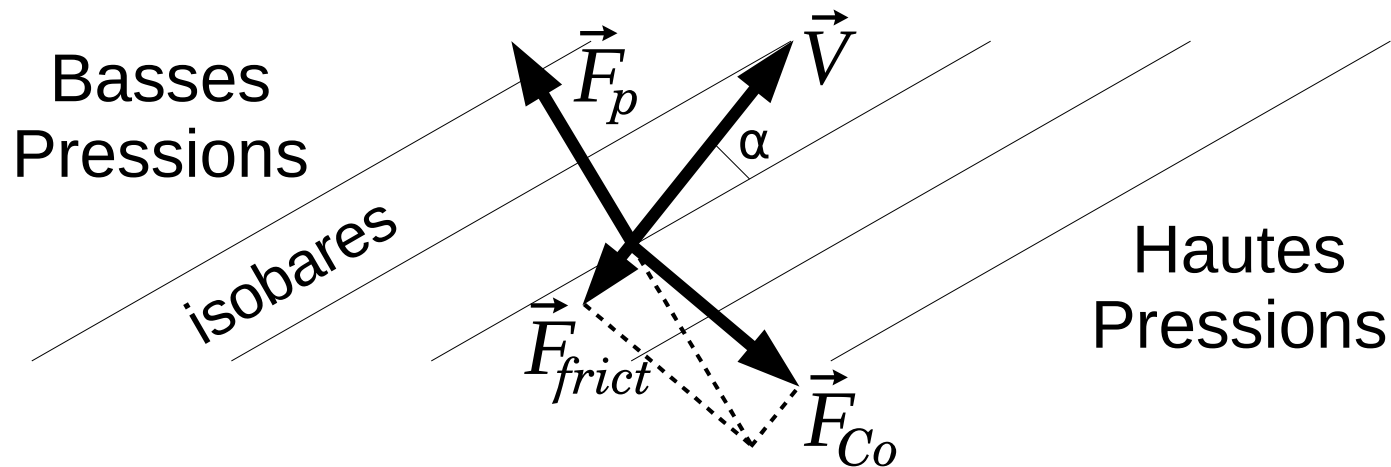
Transport d'Ekman: circulation dans l'Austral

- Transport d'Ekman vers l'équateur en surface
- Ventilation d'eau profonde



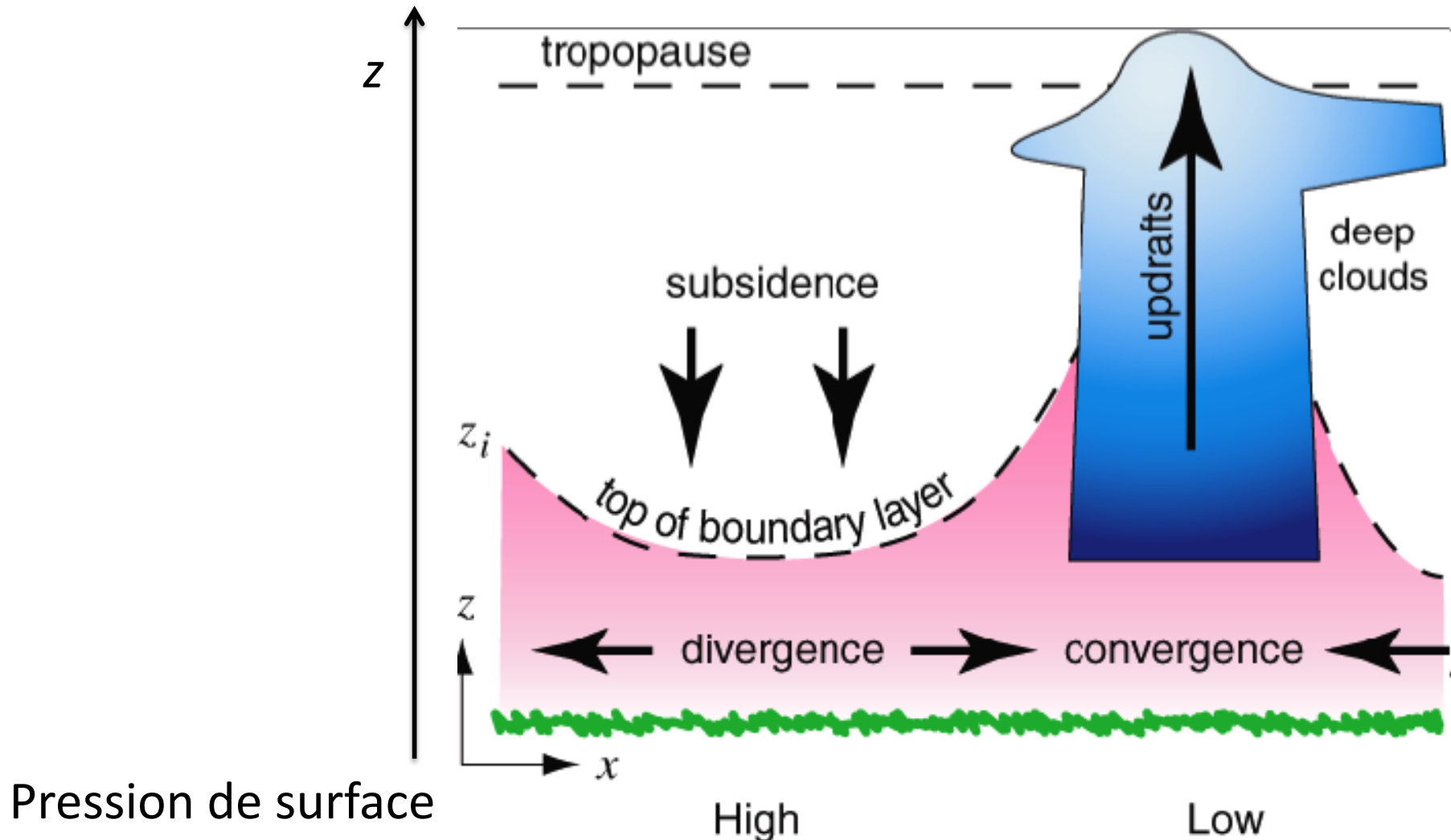
Transport d'Ekman dans l'atmosphère

- Contrainte subie en surface opposée à la tension de vent
- Transport dans la couche limite vers les basses pressions



Impact sur l'atmosphère libre : vitesses verticales

- Haute pression : divergence en surface, subsidence au dessus (air sec et stable)
- Basse pression : convergence et ascendance



Vents de surface et pression au niveau de la mer

