

# Cours de météorologie – ENPC



David POLLACK  
david.pollack@meteo.fr  
Mars 2013

3H

# Bibliographie



[De Moor et Veyre, 1991] De Moor, G. and Veyre, P. (1991). Les bases de la météorologie dynamique. Cours et manuels. Météo-France.

[Joly, 1992] Joly, A. (1992). Les tempêtes, les dépressions. Cours et manuels n°7. Météo-France.

« Physique et chimie de l'atmosphère », sous la direction de R. Delmas, G.Mégie et V.H Peuch, Belin, 2005.

[Gill, 1982] Gill, A. E. (1982). Atmosphere-Ocean Dynamics, volume 30. Academic Press.

[Holton, 1992] Holton, J. R. (1992). Dynamic meteorology. Academic Press, 3 e edition.

→ **[Malardel, 2005] Malardel, S. (2005). Fondamentaux de météorologie, éditions Cépaduès.**

# Plan de l'intervention

1. Portraits d'atmosphère
2. Les lois physiques qui régissent les mouvements atmosphériques
3. Les perturbations des moyennes latitudes
4. La convection

# Portraits d'atmosphère

- Généralités – L'énergie solaire
- Notion d'échelle
- Portraits d'atmosphère

# Généralités : composition chimique de l'atmosphère

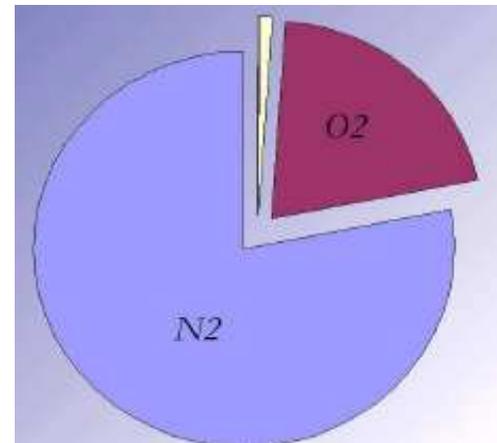
Évolution très lente et très longue de la composition chimique de l'atmosphère (→paléoclimatologie)  
mais accélération de cette évolution depuis la révolution industrielle  
(effet anthropique : ex augmentation du CO<sub>2</sub>)

Jusqu'à 100 km d'altitude, atmosphère = mélange de gaz dans des proportions quasi-uniformes.

On distingue **l'Air sec** et **l'Air humide** = Air sec + Vapeur d'eau, car la vapeur d'eau est traitée à part compte tenu de sa très grande variabilité dans les 1<sup>ers</sup> km et de sa faculté à changer d'état dans les conditions usuelles de températures et de pression:

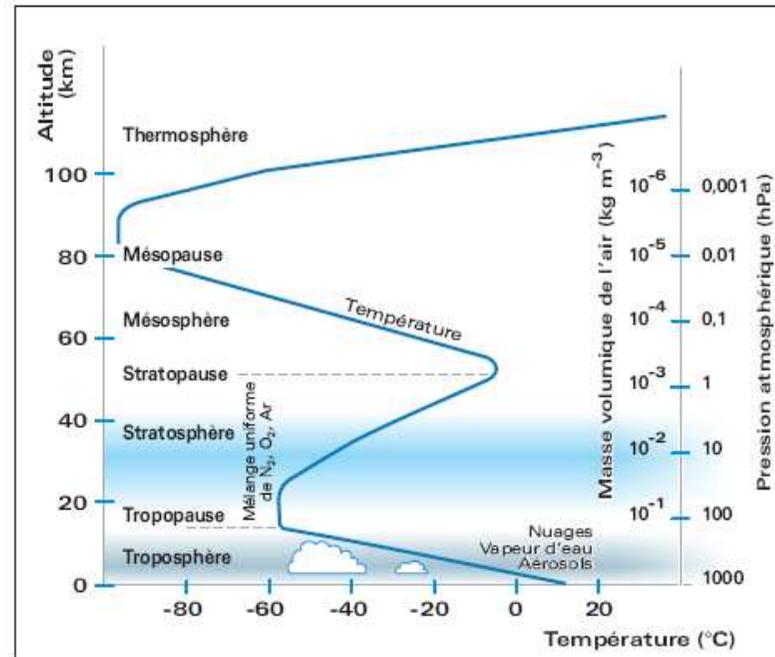
Composition de l'air sec (en % de sa masse) :

- 75.5 d'N<sub>2</sub>
- 23.1 d'O<sub>2</sub>
- 1.3 d'Ar
- traces d'autres gaz comme par ex le CO<sub>2</sub>



# Généralités : profil vertical moyen de température

Il permet de définir le découpage vertical moyen de l'atmosphère



La couche la plus basse entre le sol et la tropopause s'appelle la troposphère. C'est là que se trouve la majeure partie de la masse atmosphérique (90 %) et qu'ont lieu la plupart des phénomènes météorologiques.

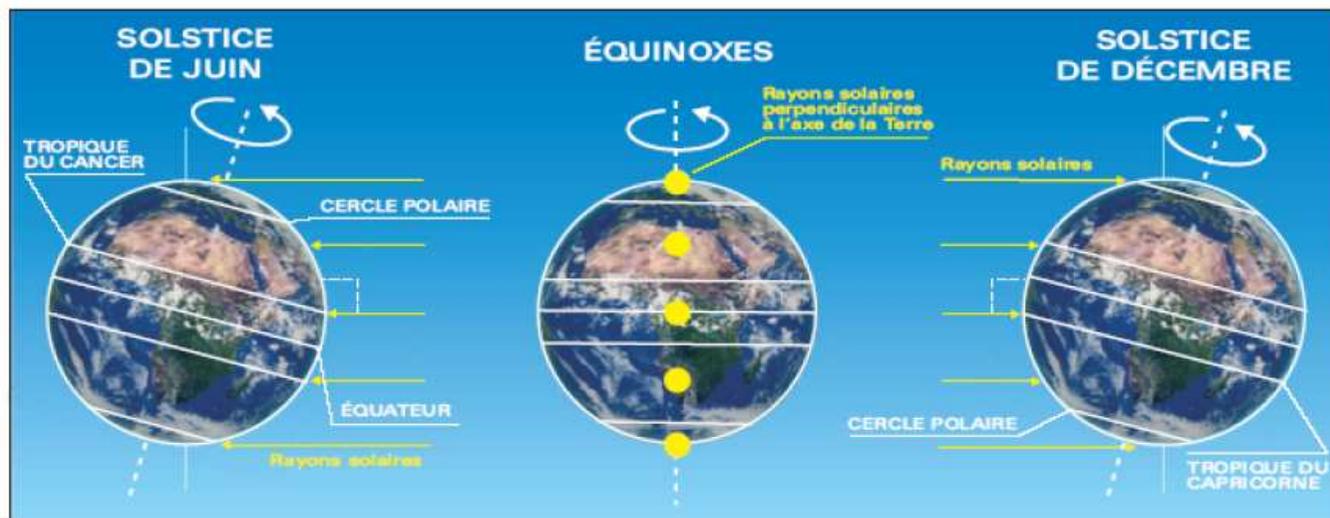
La tropopause sépare la troposphère de la stratosphère : altitude moyenne = 10 km mais varie en fonction de la latitude et de la situation météorologique. Les variations de l'altitude de la tropopause influent fortement les phénomènes météorologiques.

La couche limite atmosphérique (1ères centaines de mètres de la troposphère) → lieu de nombreux échanges de matière, de chaleur et de quantité de mouvement d'où un caractère turbulent.

# L'énergie solaire

C'est le rayonnement solaire qui est la source principale d'énergie et le moteur de la circulation atmosphérique. Ce moteur n'est pas constant dans le temps ni uniforme à la surface de la planète. Cycle saisonnier et cycle diurne font partie de ces variations.

Chaque planète a une période de rotation propre qui fixe la durée d'une journée. L'angle avec lequel les rayons lumineux atteignent un point du globe varie au cours du trajet annuel de la planète autour du soleil : le phénomène est à l'origine des saisons.



A midi aux équinoxes, les rayons arrivent perpendiculairement à la surface de la terre. Aux solstices, 1 des 2 calottes polaires (cercle polaire =  $66.6^\circ$ ) est dans l'obscurité permanente et l'autre calotte polaire reste constamment orientée vers le soleil. Les rayons solaires arrivent perpendiculairement à la surface au niveau de l'un des tropiques.

# L'énergie solaire

## *D'autres facteurs influencent la quantité de rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère - 1*

- La distance terre-soleil : actuellement le maximum (aphélie) se produit vers le solstice d'été de l'hémisphère nord. Le minimum (périhélie) se produit pendant le solstice d'hiver de l'hémisphère nord

>> 3% de rayonnement en plus pendant l'été de l'HS que pendant l'été de l'HN. Mais cela est masqué par d'autres dissymétries, comme la répartition inégale des continents sur les 2 hémisphères.



## **Orbite de la Terre autour du Soleil :**

L'axe de rotation de la terre pointe vers une direction fixe de l'espace. L'angle (terre-soleil / axe de rotation)

- =  $90^\circ$  aux équinoxes
- =  $66,6^\circ$  solstice d'été
- =  $113,4^\circ$  solstice d'hiver

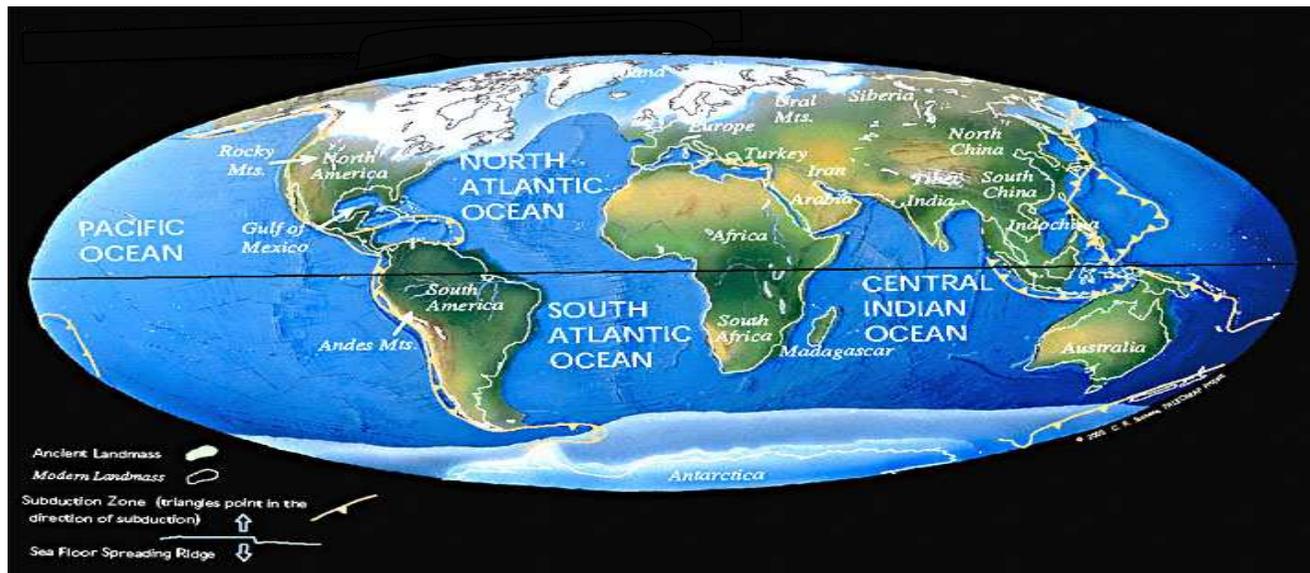
# L'énergie solaire

*D'autres facteurs influencent la quantité de rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère - 2*

. D'autres cycles astronomiques :

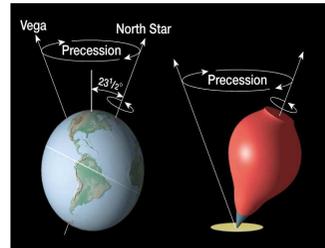
1. La précession des équinoxes :  $T = 22\ 000$  ans  
Changement de la position des équinoxes sur la trajectoire elliptique de la Terre autour du Soleil.
2. Variation de l'angle entre le plan de l'équateur et le plan de l'écliptique (plan orbital de la terre) :  $T = 41\ 000$  ans, variation entre  $22$  et  $25^\circ$
3. Variation de l'excentricité de la trajectoire terrestre :  
 $T = 100\ 000$  et  $400\ 000$  ans

Le Dernier  
Maximum Glaciaire  
(il y a 21000 ans)

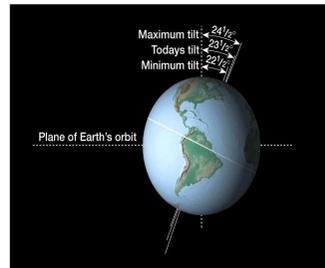


# Le cycle de Milankovitch, 1920

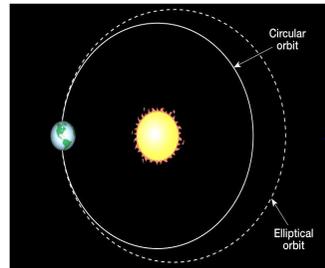
Précession



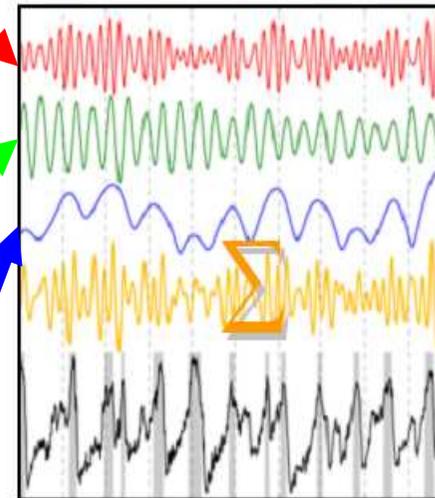
Inclinaison



Excentricité



Actuel 400000 800000



Précession  
19, 22, 24kan

Inclinaison  
41kan

Excentricité  
95, 125, 400kan

Forçage solaire  
Eté, 65N

Température

# Les phénomènes atmosphériques

L'atmosphère est soumise à plusieurs type d'excitations extérieures, qui peuvent être

- cycliques (ex : le rayonnement solaire)
- irrégulières et complexes (ex : forçage terrestre, interaction avec la surface terrestre ou océanique)

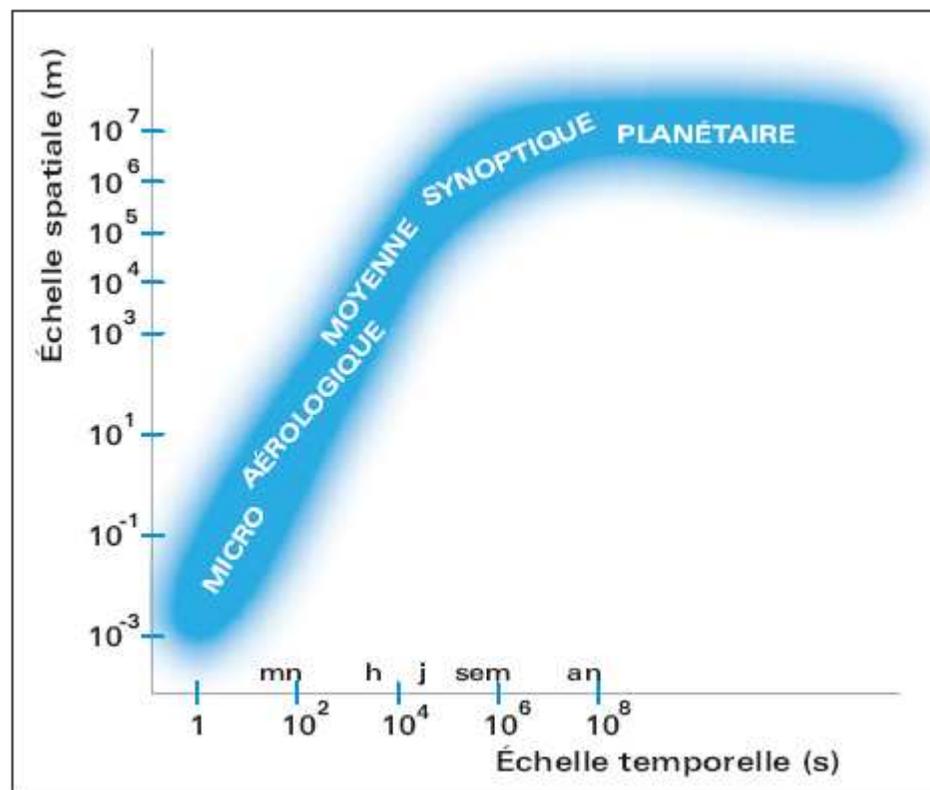
Forte variabilité spatio-temporelle de l'état initial du fluide atmosphérique.

Mise en circulation du fluide dans le but d'un retour vers l'état d'équilibre.

Les irrégularités atmosphériques constituent ce qu'on appelle couramment **les phénomènes météorologiques**

Grande variabilité spatio-temporelle des différentes circulations atmosphériques.

# Les phénomènes atmosphériques : la notion d'échelle



D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

## Échelle planétaire :

circulation persistante qui occupe une bonne partie du globe. Mise en évidence de ce type de circulation en « filtrant » les plus petites échelles par un traitement statistique adapté.

Ex : circulation de Hadley, régime de temps, mousson

## Échelle synoptique :

Dépresseion et anticyclone des moyennes latitudes, ondes d'Est tropicale et cyclones tropicaux

## Méso-échelle :

Vent régionaux, brises, lignes de grains

## Échelle aérologique :

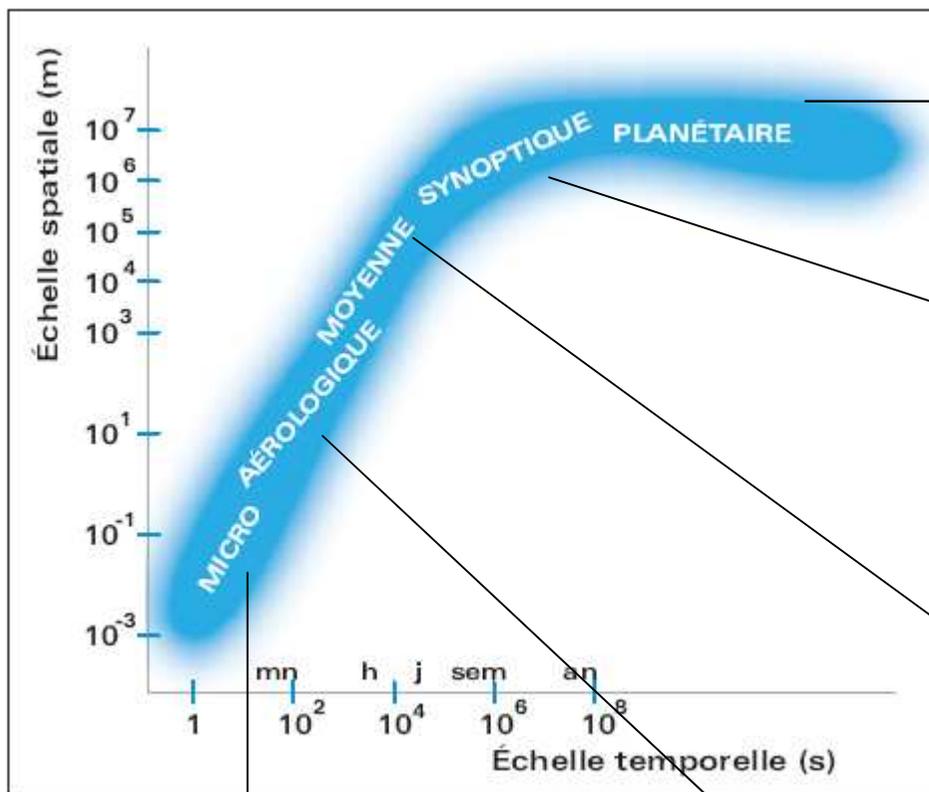
Orages isolés, tornades, thermiques pures

## Micro-échelle :

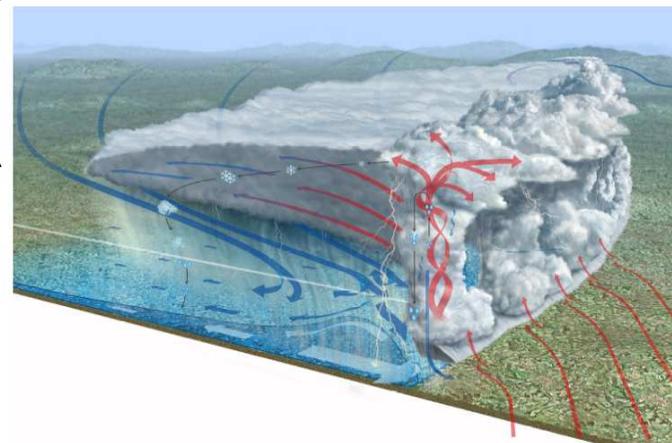
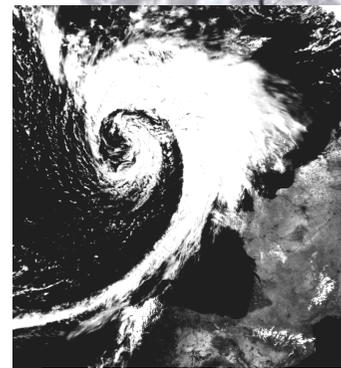
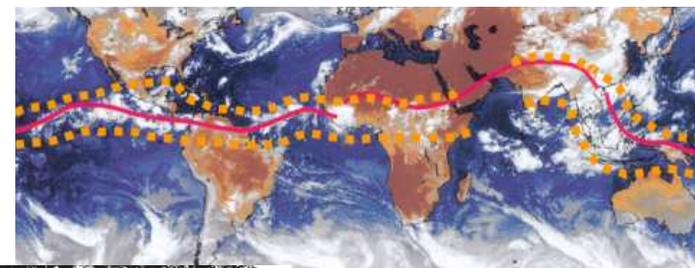
Tourbillons de poussières, rafales, microphysique des nuages (formation de gouttelettes par ex)

**Dans la réalité, toutes ces échelles sont étroitement imbriquées**

# Les phénomènes atmosphériques : la notion d'échelle



D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie



# Les phénomènes atmosphériques : interaction d'échelles

La séparation en échelles n'est qu'une « vue de l'esprit ».

En fait, **toutes les échelles interagissent.**

Par ex, un phénomène modifie son environnement ce qui va modifier le phénomène et donc à nouveau, modifier son environnement

De même, les petites structures, dépendent du phénomène, mais elle finissent par le modifier également.

En réalité, l'atmosphère est tellement complexe, qu'il faut tenir compte des processus à toutes les échelles pour obtenir une vision correcte des phénomènes atmosphériques.

# Présentation à l'échelle du globe : vue d'ensemble

*La description de l'atmosphère présentée ici est réalisée à partir d'analyses de l'état de l'atmosphère issues des principaux centres de prévision numérique*

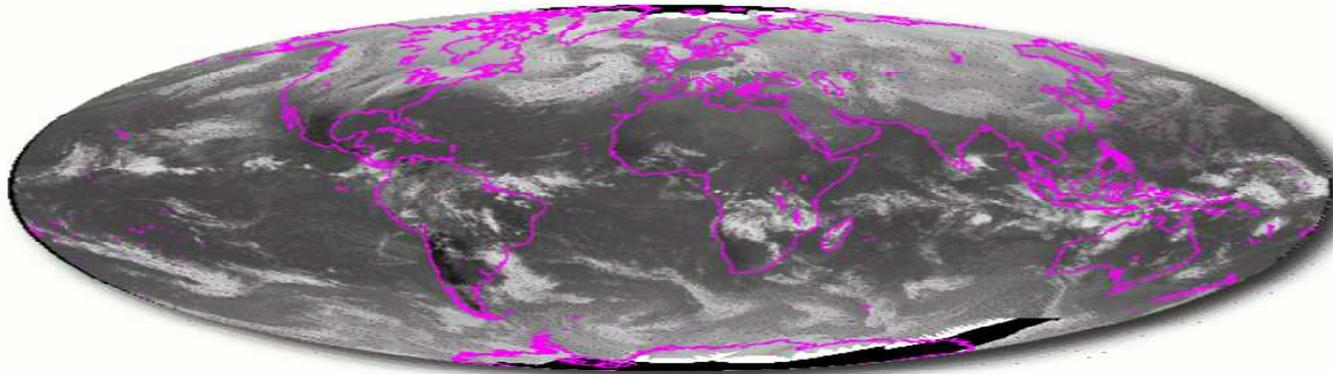
- Image satellite en janvier et juillet

Image satellite IR

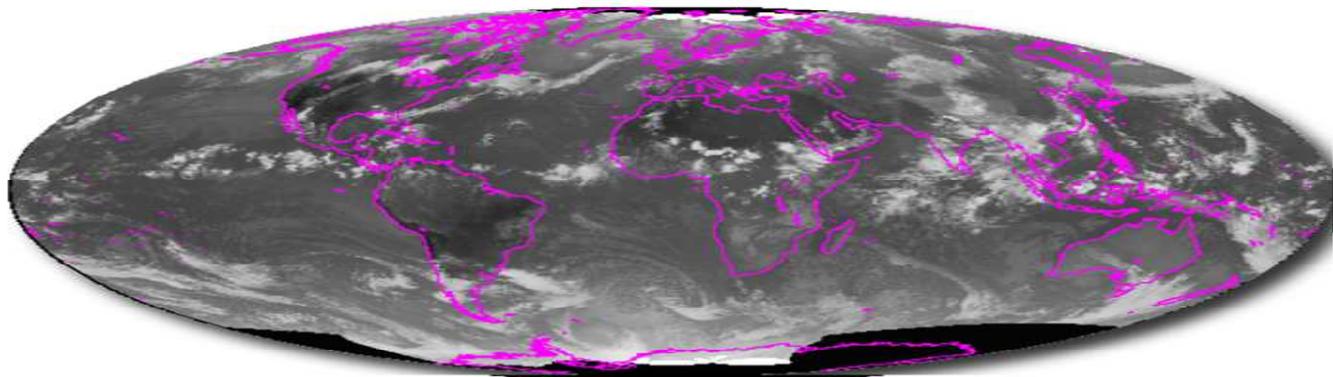
- L'atmosphère vue de profil

Profil vertical moyen  
de température

# Vue d'ensemble : image satellite infrarouge



JANVIER



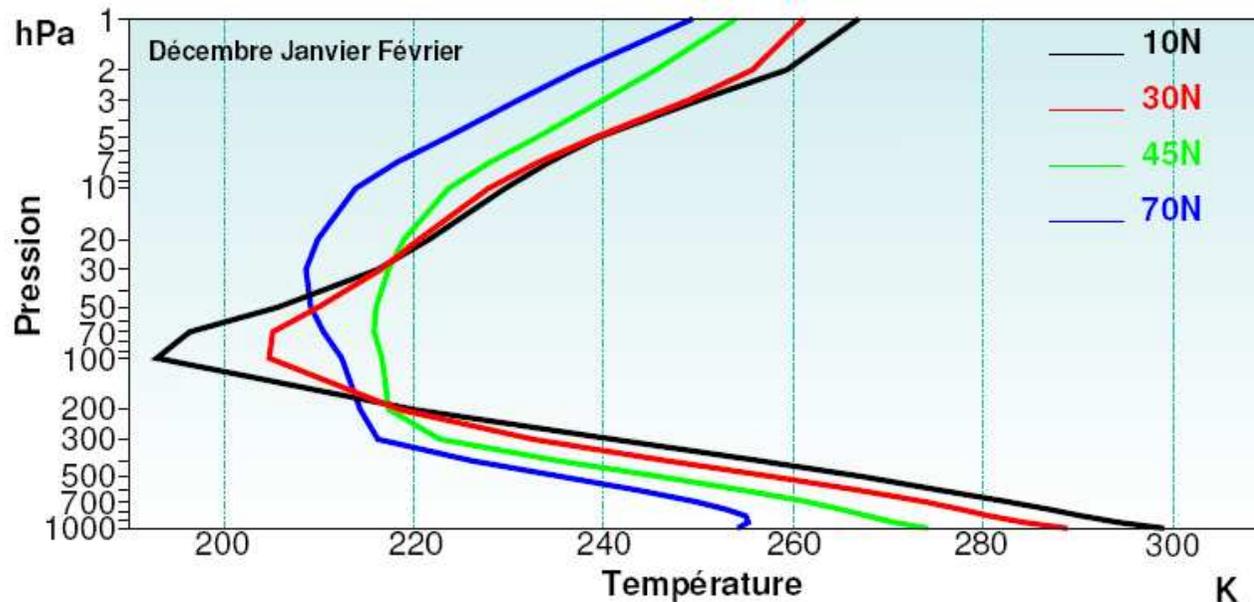
JUILLET

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

- Symétrie entre l'HN et l'HS par rapport à la bande nuageuse Intertropicale qui oscille de part et d'autre de l'équateur vers l'hémisphère d'été.
  - Aux moyennes latitudes, systèmes nuageux qui s'enroulent en spirale (sens trigo : HN ; inverse HS)
  - Bande très pauvre en nuages (vers 30°) surtout sur les continents désertiques.
- Une certaine symétrie zonale (symétrie du forçage atmosphérique par le rayonnement solaire mais imparfaite (océan/continent, relief, etc).

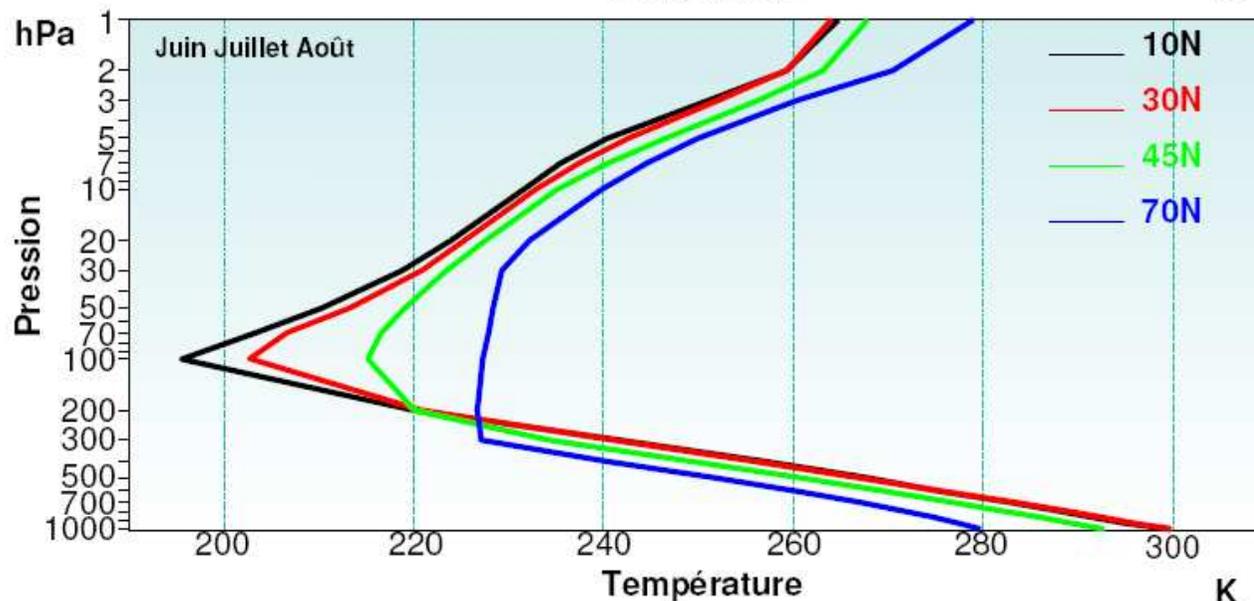


# Vue d'ensemble : profil vertical de température moyenne



Dans la troposphère, décroissance verticale quasi-linéaire en fonction du Logarithme de la pression (-6°/km)

La première rupture de pente est la signature moyenne de la tropopause



L'altitude de cette rupture de pente dépend de la latitude et de la saison.

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

# Présentation à l'échelle du globe : Bilan radiatif

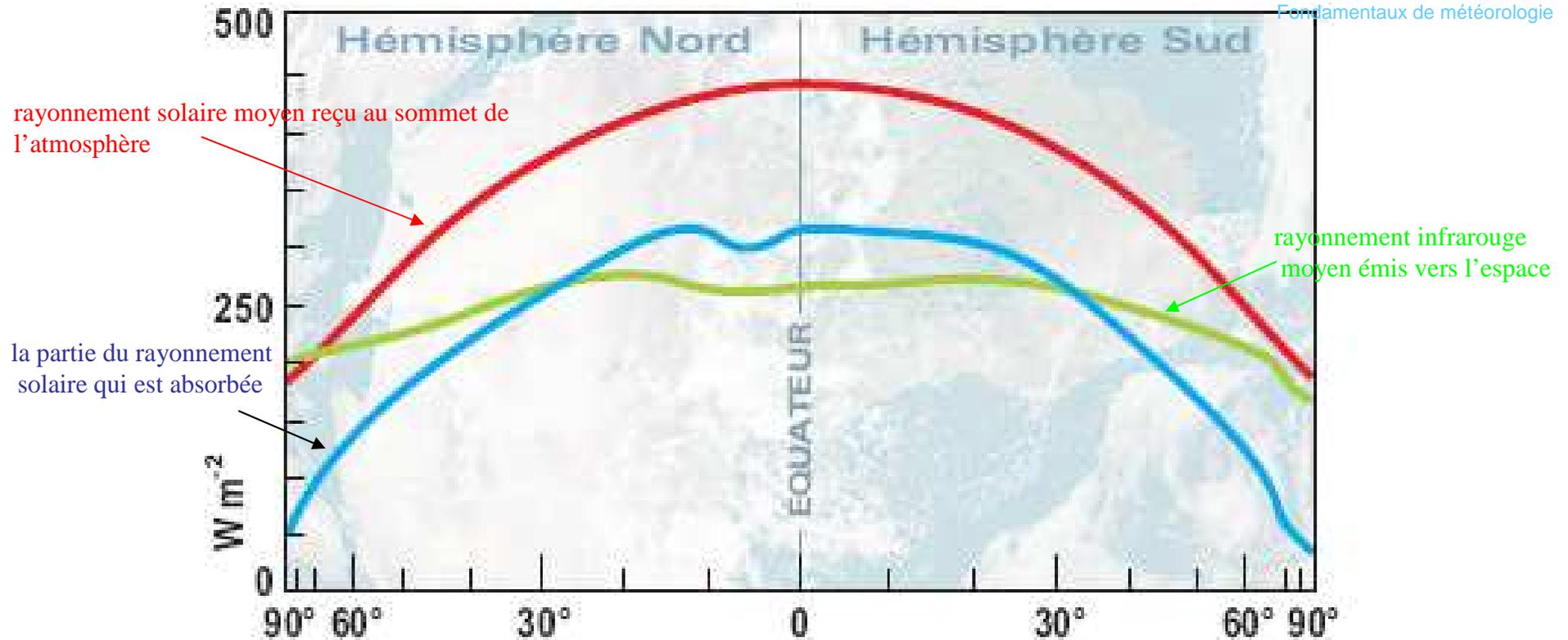
- par cercle de latitude
- sur la verticale
- sur la planète

## Synthèse :

- Les courbes en moyenne zonale montrent un déséquilibre radiatif méridien et vertical  
→ nécessité de mélange assuré par la convection (petite échelle) et des mouvements de grande échelle horizontale.
2. Le bilan radiatif sur la planète montre des contrastes longitudinaux importants (albédo, ZCIT, mousson)

# Bilan radiatif de la Terre

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

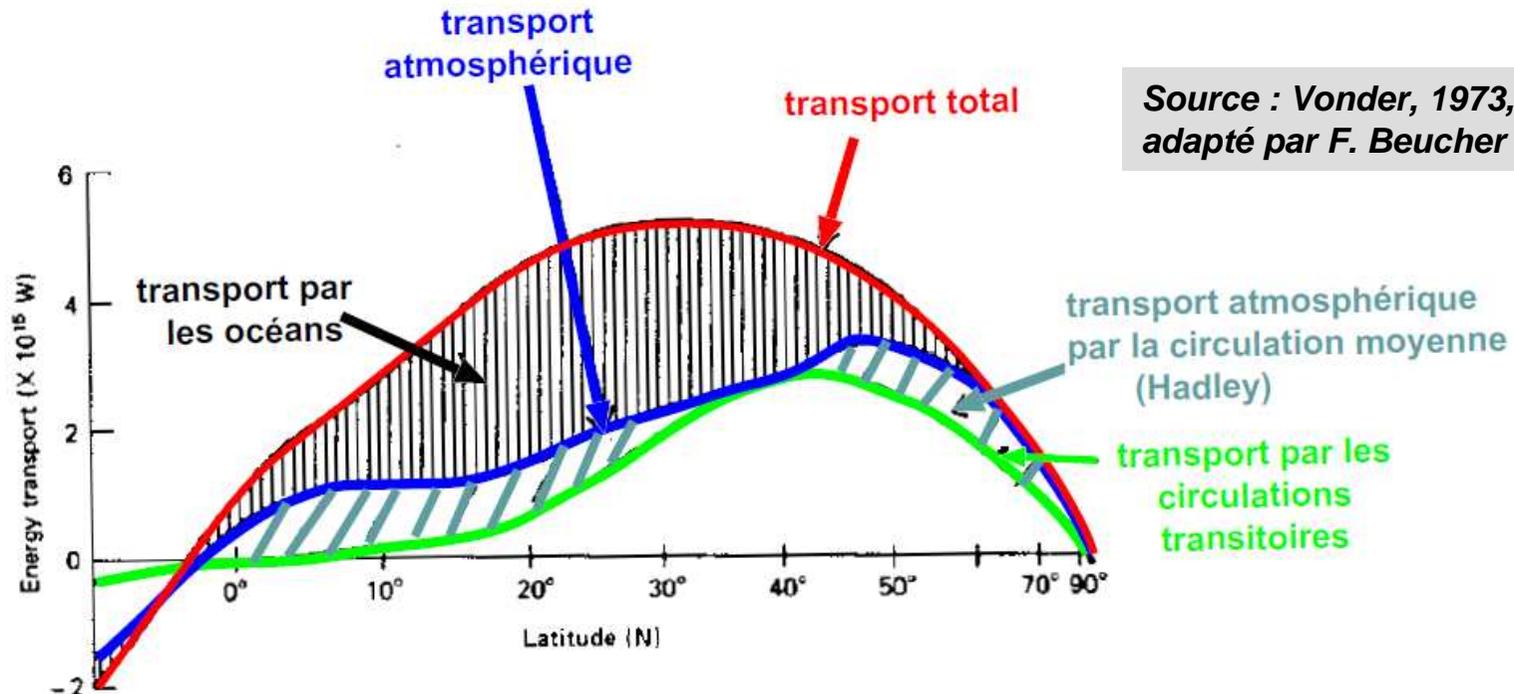


En moyenne annuelle, le bilan radiatif des régions polaires est déficitaire et celui des régions équatoriales et tropicales est excédentaire.

Comme aucune région ne se réchauffe ni se refroidit perpétuellement → transport de l'excédent d'énergie vers les plus hautes latitudes.



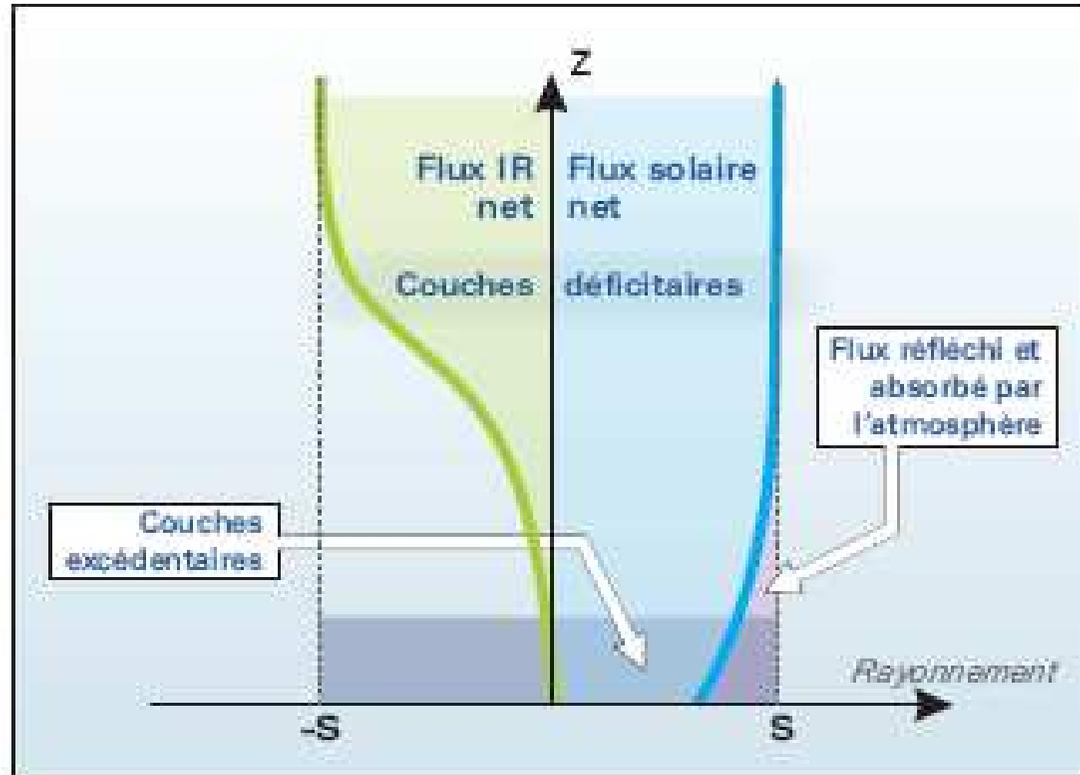
## Importance relative du transport atmosphérique par rapport au transport océanique



-Aux hautes latitudes, le **transport atmosphérique domine** et est maximum entre 40° et 50° de latitude quelle que soit l'atmosphère.

-Aux basses latitudes, le **transport océanique est prépondérant** (>50% du transport total d'énergie) et maximum vers 30°N. Dans l'hémisphère sud, le pic est atteint vers 20°S.

# Bilan radiatif moyen sur la verticale



D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

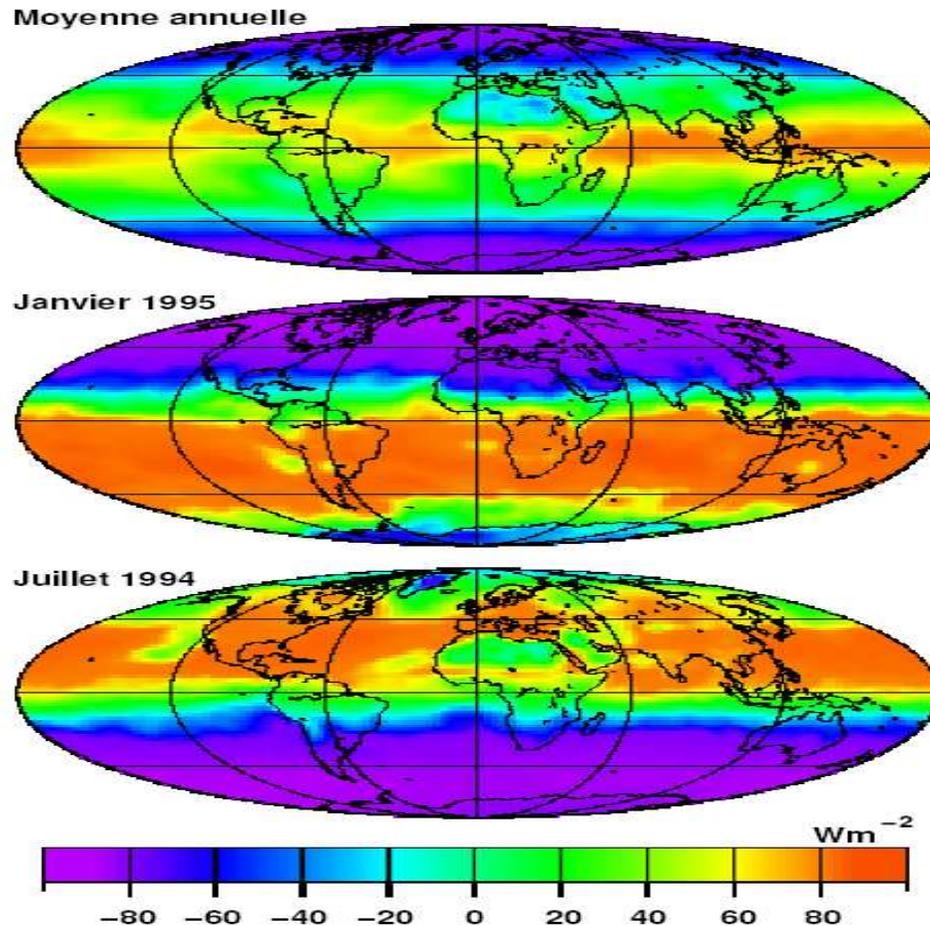
L'atmosphère est quasi-transparente au rayonnement solaire reçu sauf dans les basses couches (courbe de droite)

Le flux radiatif sortant vers l'espace provient plutôt des hautes couches de l'atmosphère.

Donc, déséquilibre vertical  $\rightarrow$  nécessité de mélange vertical (convection pour la petite échelle + circulation de grande échelle (Hadley))



# Flux radiatif net au sommet de l'atmosphère



D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

Représente le bilan : énergie absorbée – énergie émise  
Hémisphère d'été globalement excédentaire, sauf pour les grands déserts (Sahara)

# Présentation à l'échelle du globe : le vent

On distingue le vent zonal  $u$  ( $>0$  pour un vent d'Ouest) et le vent méridien  $v$  ( $>0$  pour un vent de Sud)

- Profil méridien de la moyenne zonale et verticale du vent zonal
- Champ de vent zonal moyenné
- Profil méridien de la moyenne zonale du vent zonal
- Profil méridien de la moyenne zonale du vent méridien et profil méridien de la moyenne zonale de la vitesse verticale

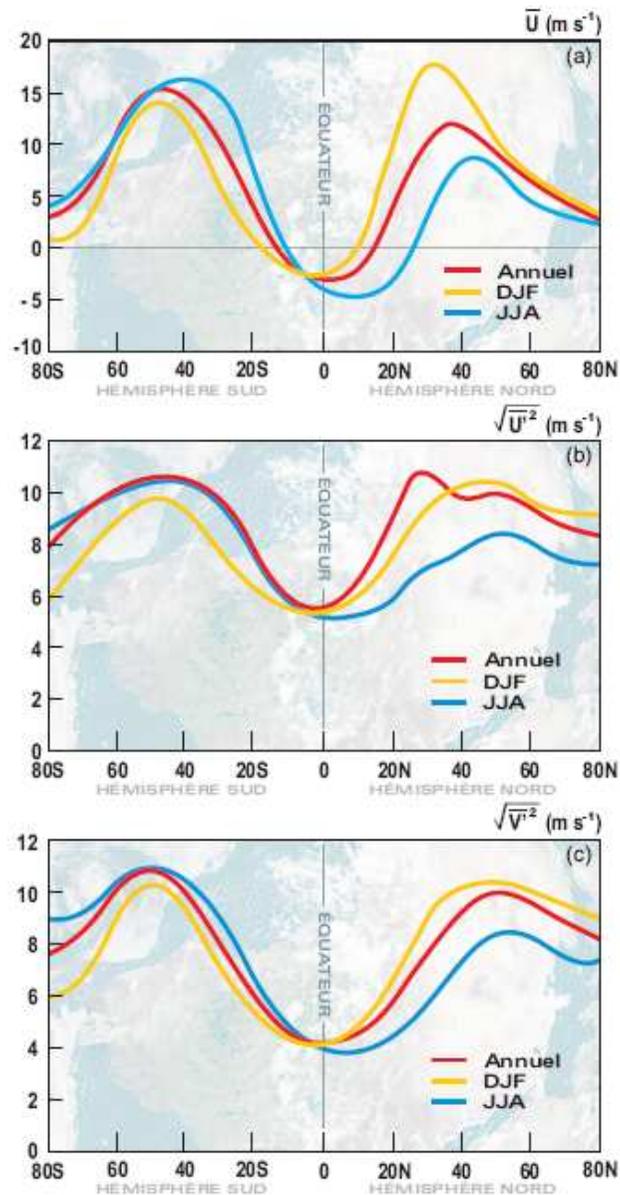
## Synthèse :

En étudiant les champs en moyenne annuelle, on met en évidence :

- le courant jet subtropical
- les alizés
- les cellules de Hadley
- la ZCIT

Toutefois, ces différentes structures ne sont pas toujours visibles au jour le jour, possèdent une variabilité spatio-temporelle grande (intra-saisonnière), sont influencées par la nature des basses couches (océan, continent, relief), ne sont pas nécessairement axisymétriques.

# Profils méridiens du vent

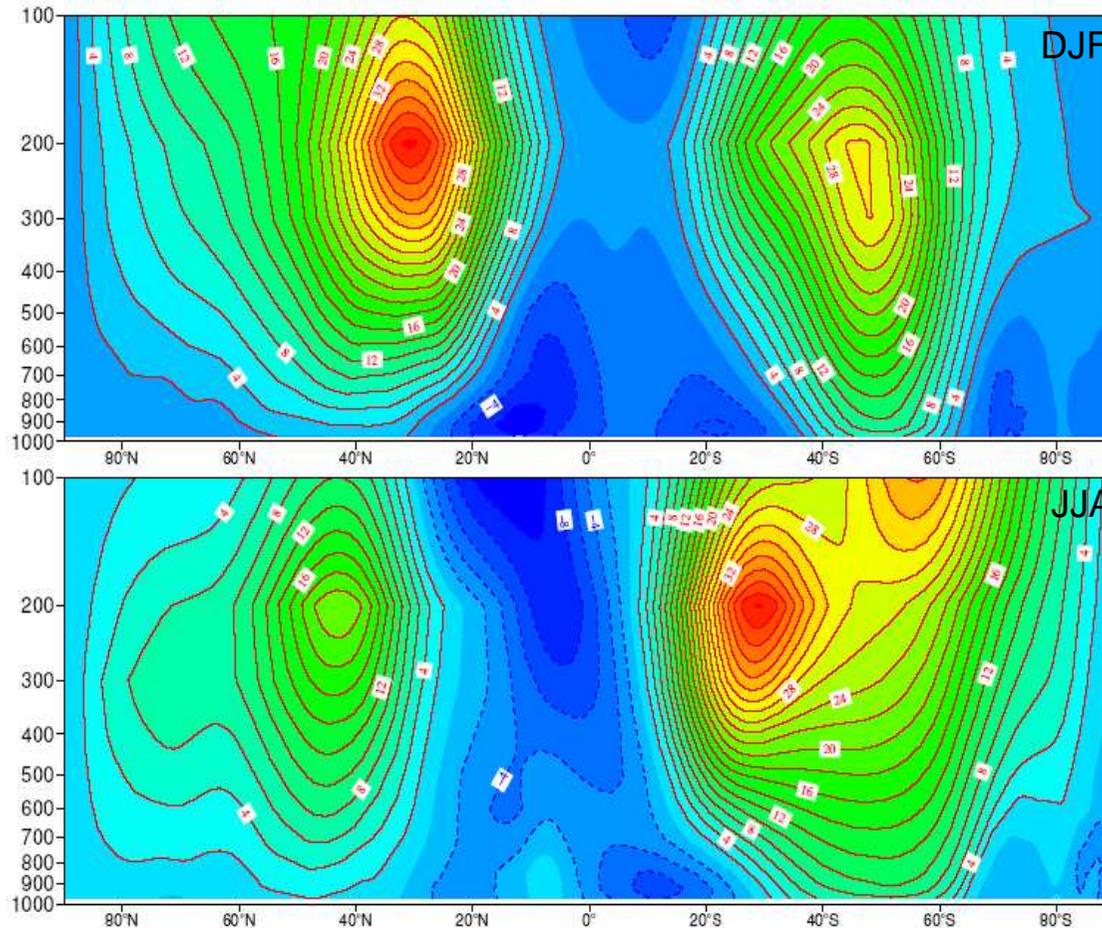


En moyenne, les vents sont d'Ouest aux moyennes et hautes latitudes et d'Est aux basses latitudes

Ecart-type de vent méridien très fort (>10m/s), alors que le vent méridien moyen (non représenté) l'écart-type est de l'ordre du m/s

→ prudence dans l'interprétation des champs moyens

# Moyenne zonale du vent zonal



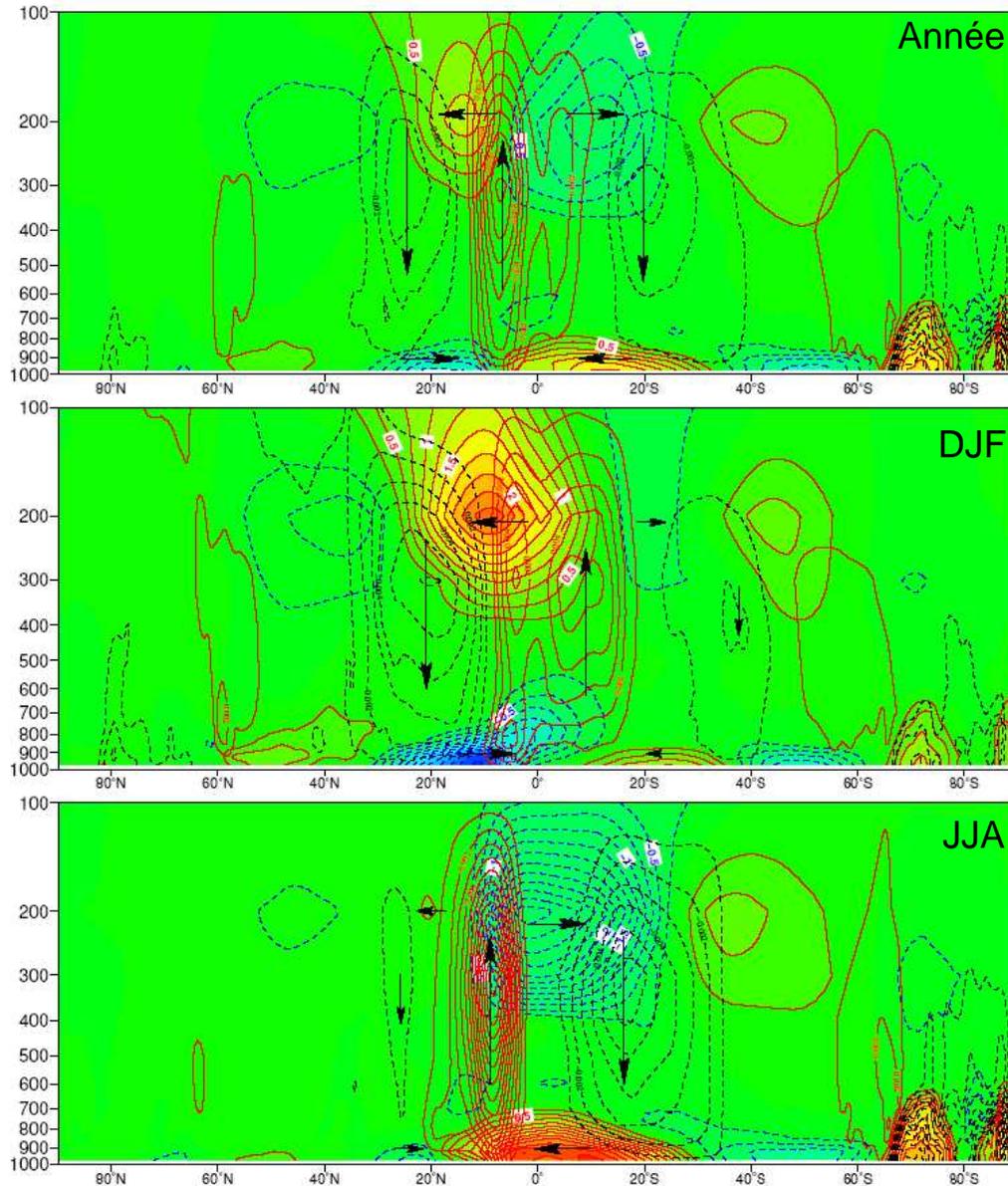
Présence du courant jet subtropical :  
noyau de vent très fort au niveau de la tropopause vers 30° de latitude, plus fort à un niveau de pression donné dans l'HS

Dans l'hémisphère d'été, noyau moins intense et plus proche du pôle qu'en hiver

Dans la bande tropicale, vents d'Est ;  
maximum près du sol et plus forts dans l'hémisphère d'hiver → alizés

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

# Moyenne zonale du vent méridien



Le maximum de vent méridien moyen est plus faible que le maximum de vent zonal

2 extréma de signes opposés :

- dans les basses couches (convergence)
- au voisinage de la tropopause (divergence)

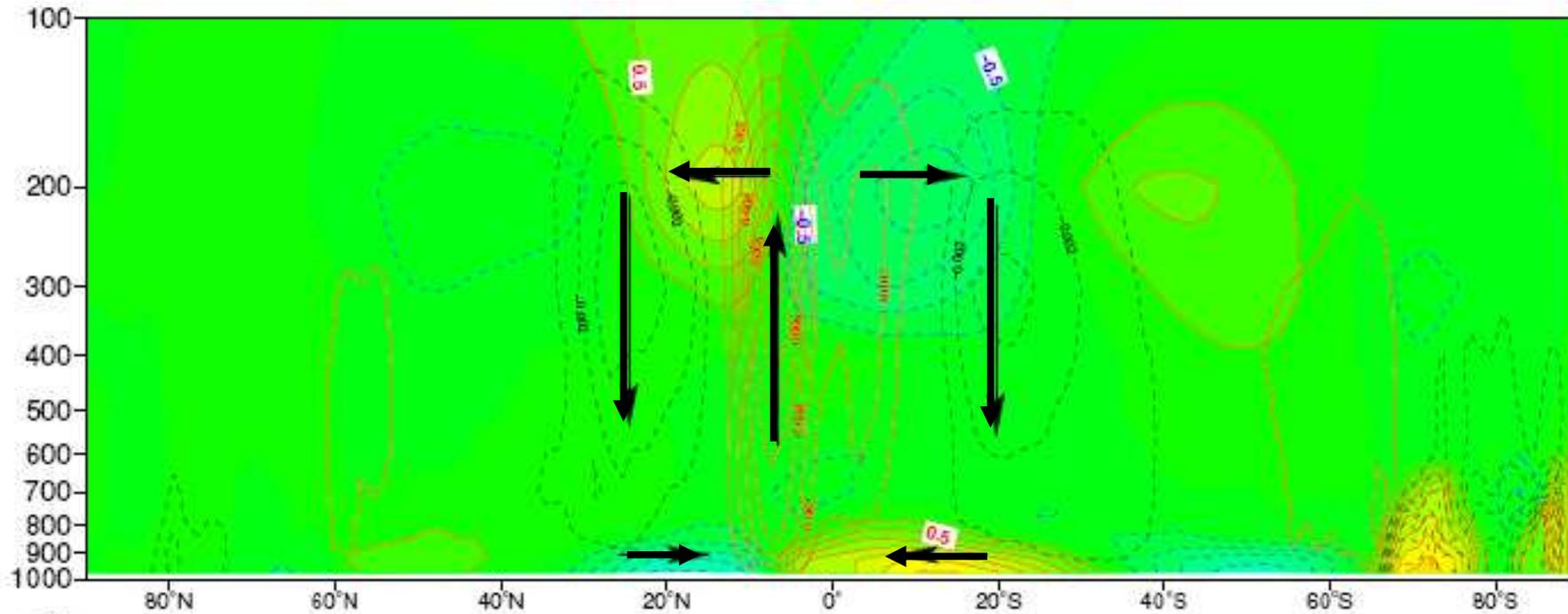
Avec la vitesse verticale → circulation fermée (**visible en moyenne annuelle**) :

- 2 cellules de part et d'autre de l'équateur (cellules de Hadley)
- ZCIT : zone de convergence intertropicale = zone de convergence des alizés en basses couches

Variations de ces circulations avec les saisons : seule la cellule de l'hémisphère d'hiver est bien marquée

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

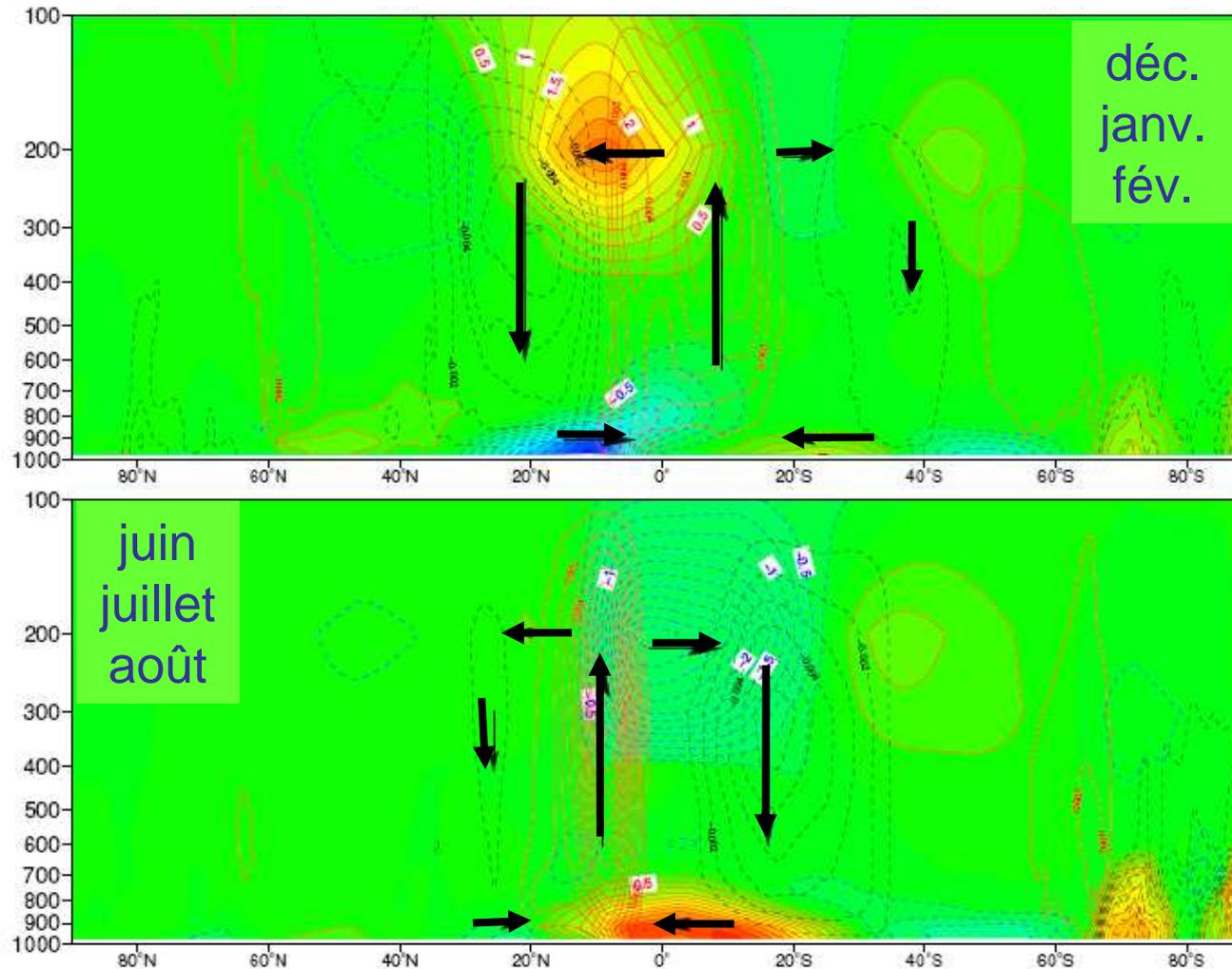
## CELLULES DE HADLEY – en moyenne annuelle



Moyennes annuelles de vent **méridien** et de vitesse verticale.

*Les flèches résument, sur les zones de maximums, l'info des champs superposés.*

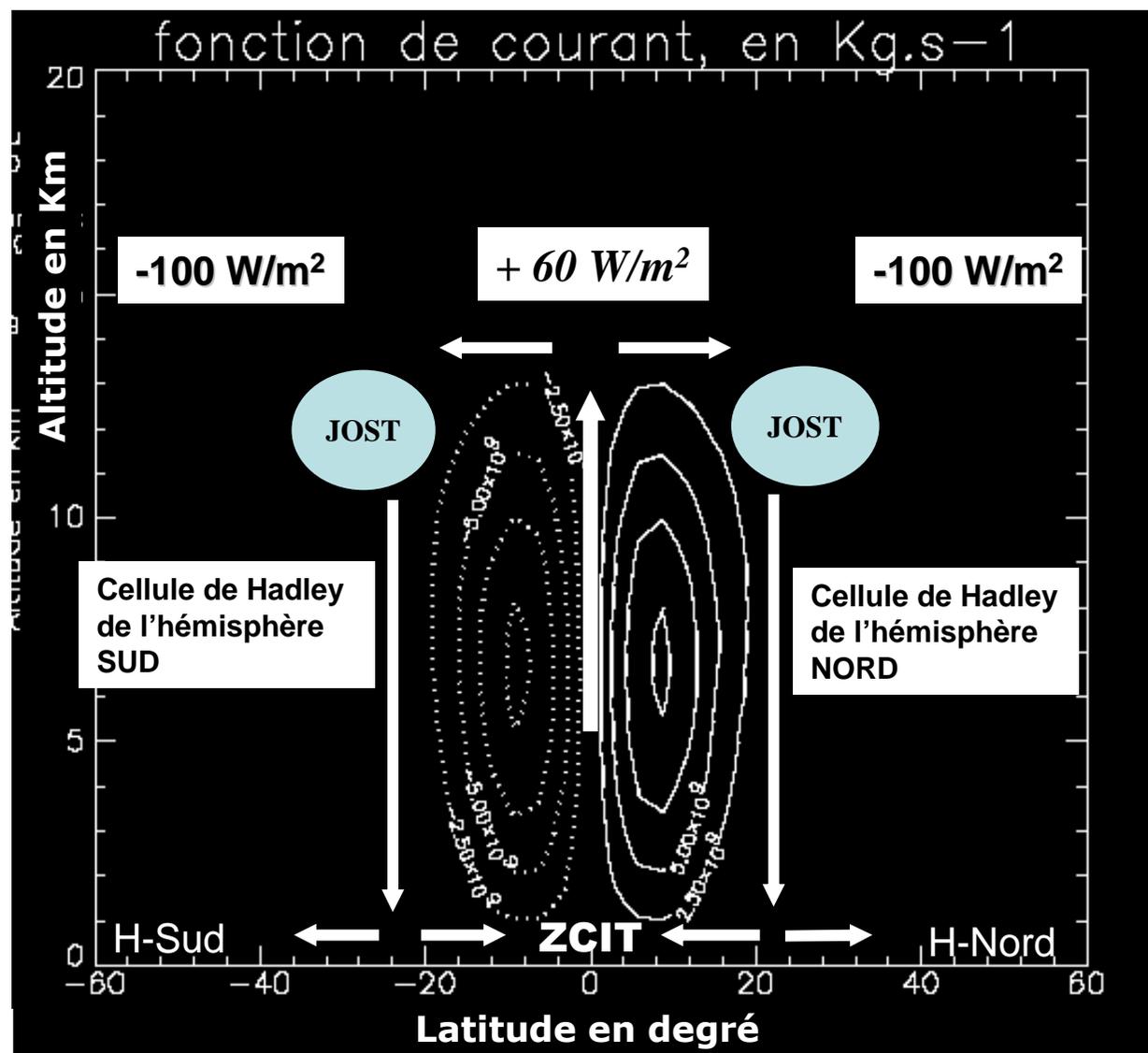
# CELLULES DE HADLEY – moyenne saisonnière



**Moyennes  
saisonnnières de vent  
méridien et de  
vitesse verticale.**

**Seule la cellule de  
l'hémisphère  
d'hiver est bien  
marquée.**

## Les cellules de Hadley en moyenne annuelle (simulation numérique)

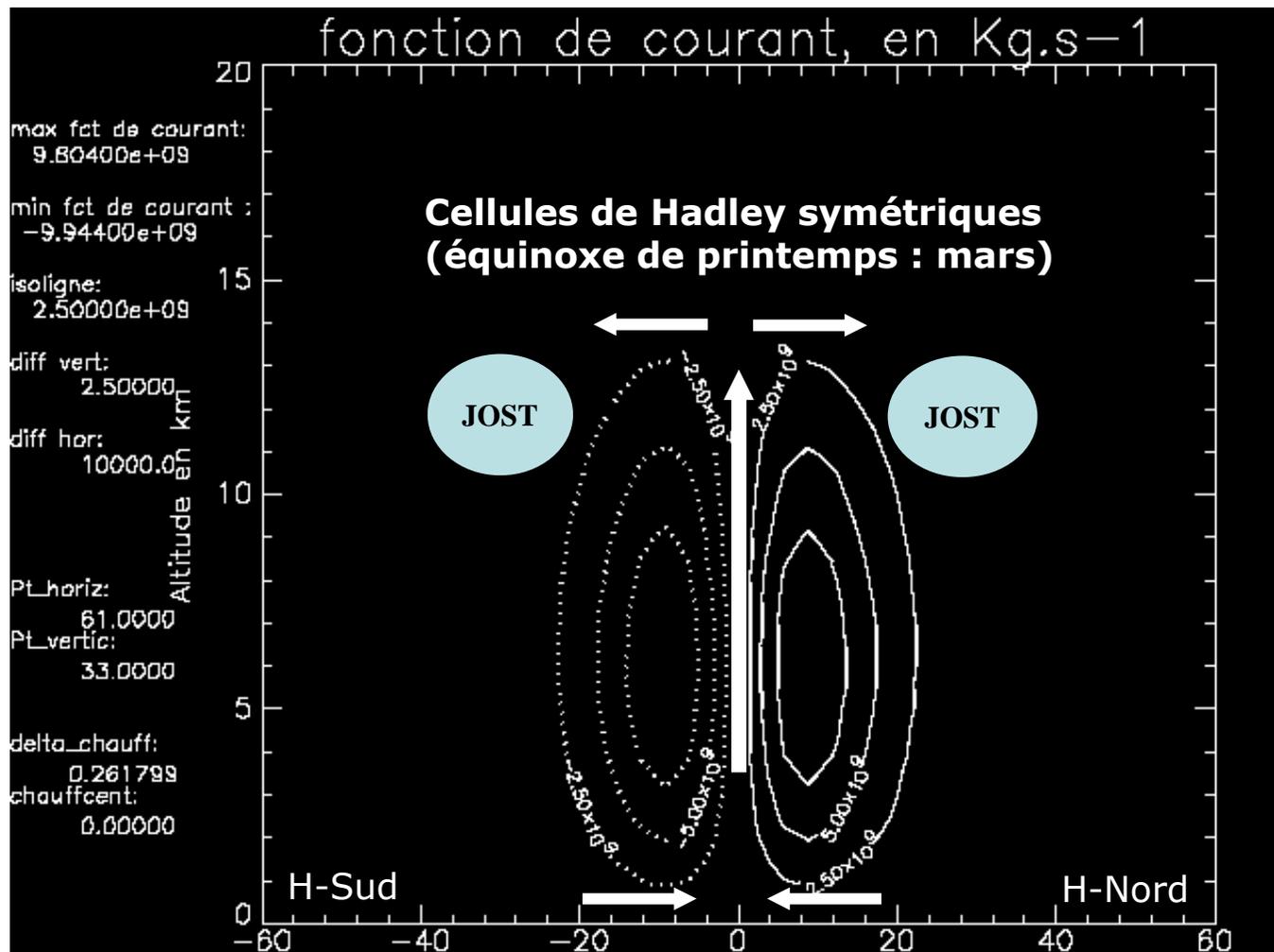


**Entre  $30^\circ\text{S}/30^\circ\text{N}$ ,** le bilan radiatif est **positif** au sommet de l'atmosphère ( $\approx 60 \text{ W/m}^2$  à l'équateur) et négatif ailleurs.

⇒ génère une circulation atmosphérique méridienne d'échelle planétaire appelée **cellule de Hadley** et deux **JOST (Jet d'Ouest SubTropical)** de même intensité, positionnés vers  $30^\circ$  de latitude.

Modèle 2D méridien  
Source : F.Beucher

## Les cellules de Hadley aux équinoxes



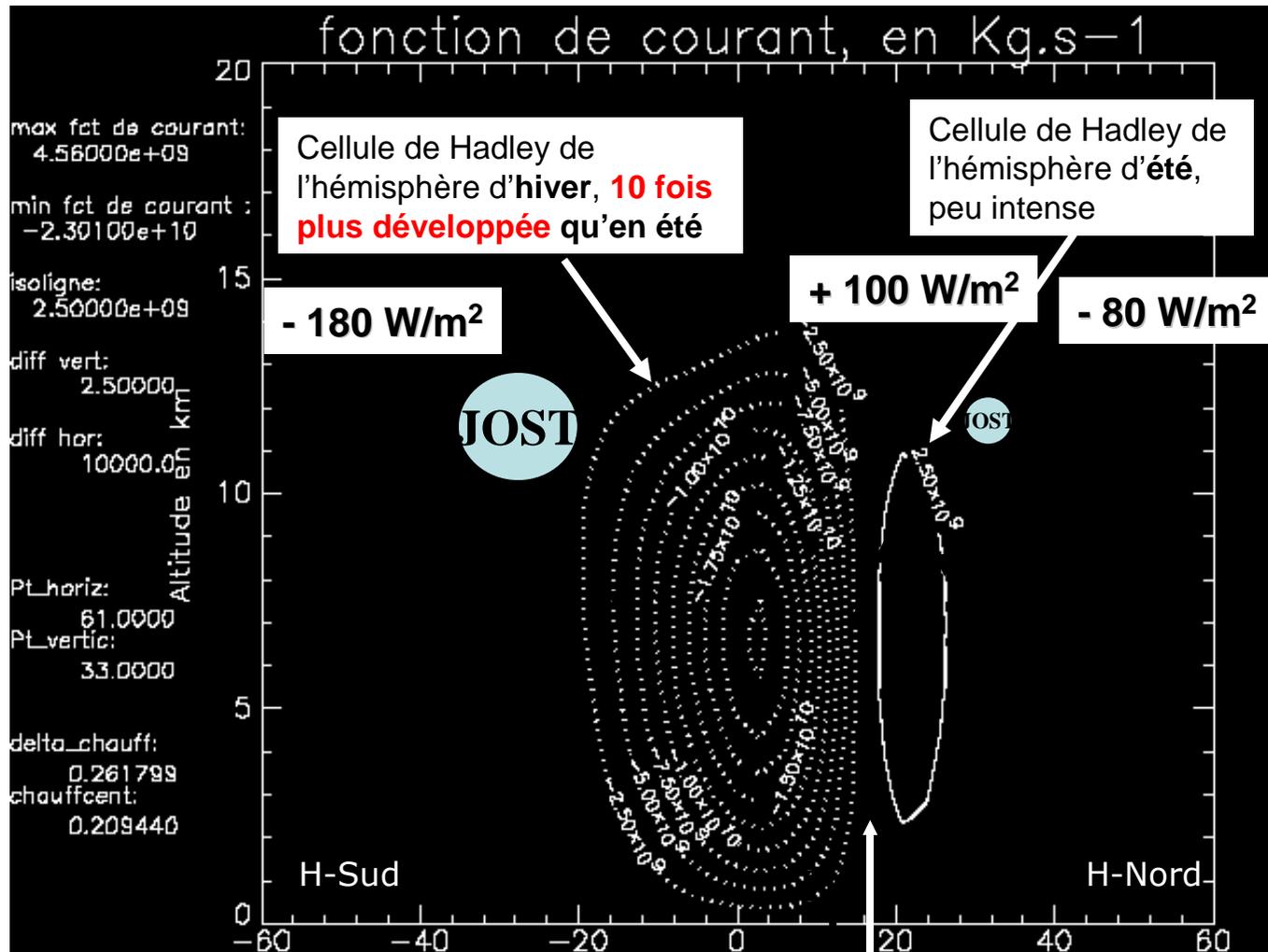
ZCIT à  
l'équateur

Aux **équinoxes**, les deux cellules de Hadley sont quasiment **équilibrées** et **symétriques** par rapport à l'équateur car le chauffage maximum de la troposphère se situe au niveau de l'équateur.

Modèle 2D méridien  
Source : F. Beucher

Latitude (degré)

## Les cellules de Hadley en juillet (été boréal)



### Cycle saisonnier des cellules de Hadley :

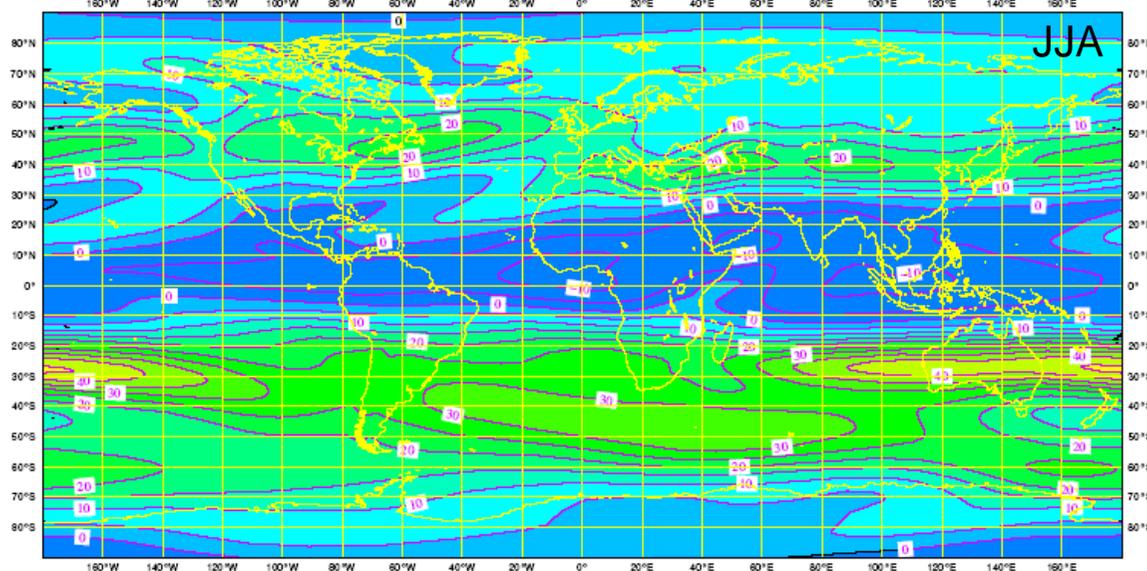
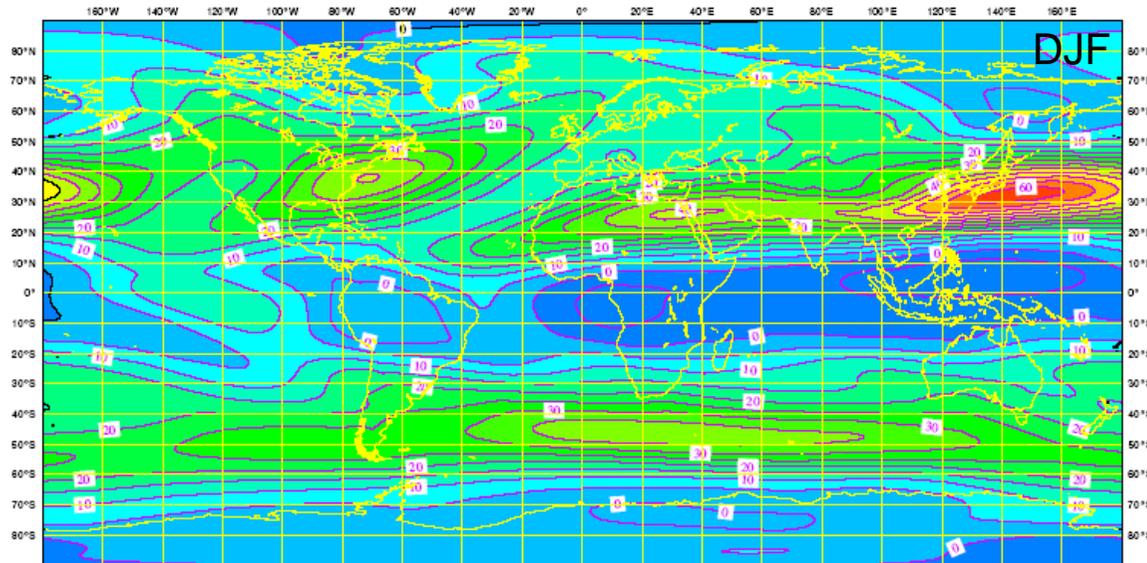
⇒ Dans l'hémisphère d'hiver, le **déficit radiatif** est **le plus élevé** donc le transport de chaleur vers les pôles s'accroît, donc la cellule de Hadley y est plus développée.

⇒ Le JOST dans l'hémisphère d'hiver est beaucoup plus développé que dans l'hémisphère d'été

Modèle 2D méridien  
 Source : F. Beucher

ZCIT décalée vers l'hémisphère d'été

# Vent zonal moyenné



Le jet subtropical ne correspond pas à un axe de vent fort continu (influence du relief, des continents)

Structure plus régulière dans l'HS

Vent maximal sur les bords ouest des Océans Pacifique et Atlantique

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

# Présentation à l'échelle du globe : l'eau

Dans le bilan, on distingue la vapeur d'eau et les précipitations :

Profil méridien de la moyenne zonale du contenu en vapeur d'eau

Champs de précipitation

## Synthèse :

Les maxima de vapeur d'eau se trouvent dans la tropopause (près du sol) et au niveau de la ZCIT

Au niveau des précipitations, on remarque de forts contrastes (océans/continents)

Les maxima de précipitations sont, le plus souvent, la signature de la ZCIT, des moussons

Les minima correspondent aux anticyclones subtropicaux et aux grands déserts

Aux moyennes latitudes, maximum relatif plus marqué dans l'hémisphère d'hiver (perturbations baroclines)

# Moyenne zonale du contenu en vapeur d'eau

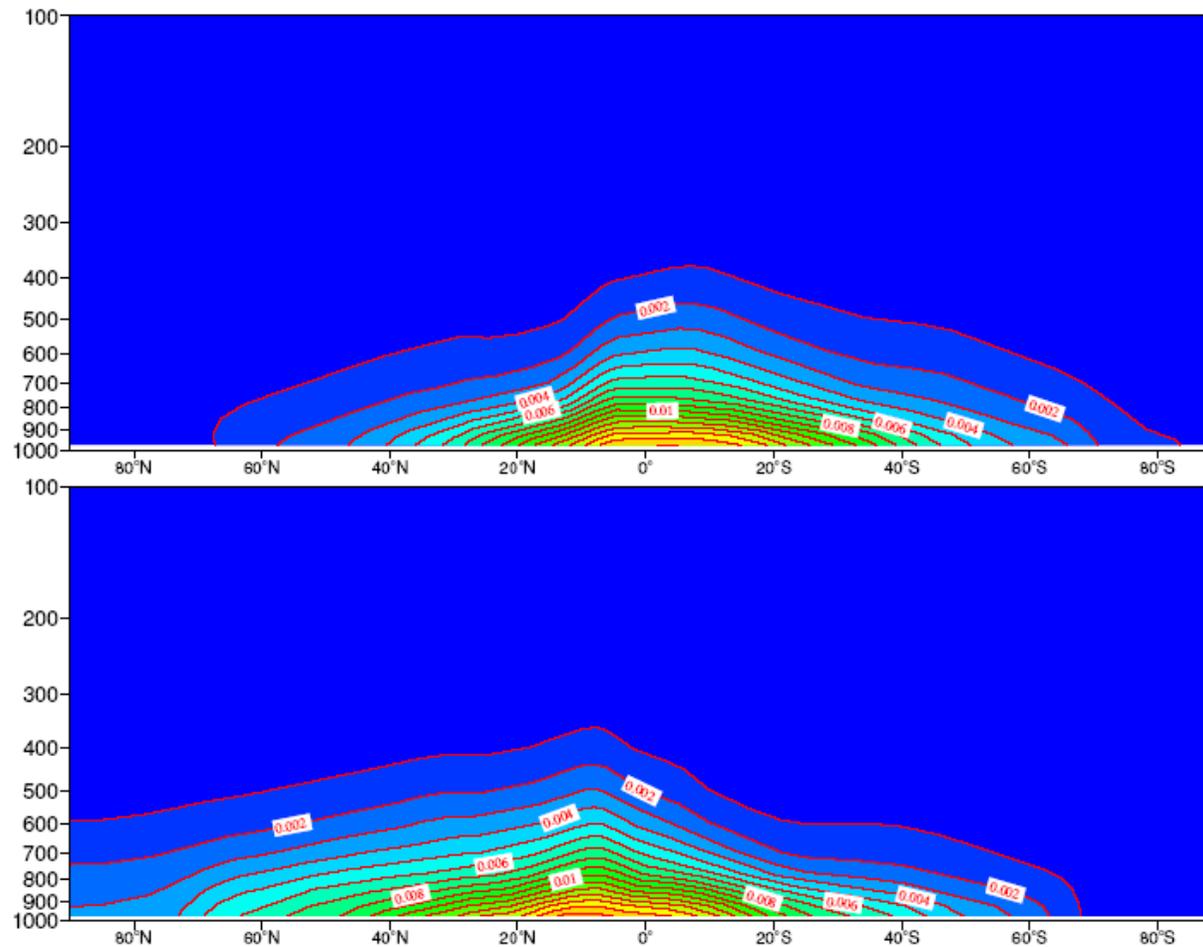


FIG. 3.21 – Moyenne zonale du contenu en vapeur d'eau (en kg de vapeur par kg d'air) entre 1000 hPa et 100 hPa sur les 44 ans de réanalyse ERA40 (a) décembre-janvier-février (c) juin-juillet-août

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

# Précipitations

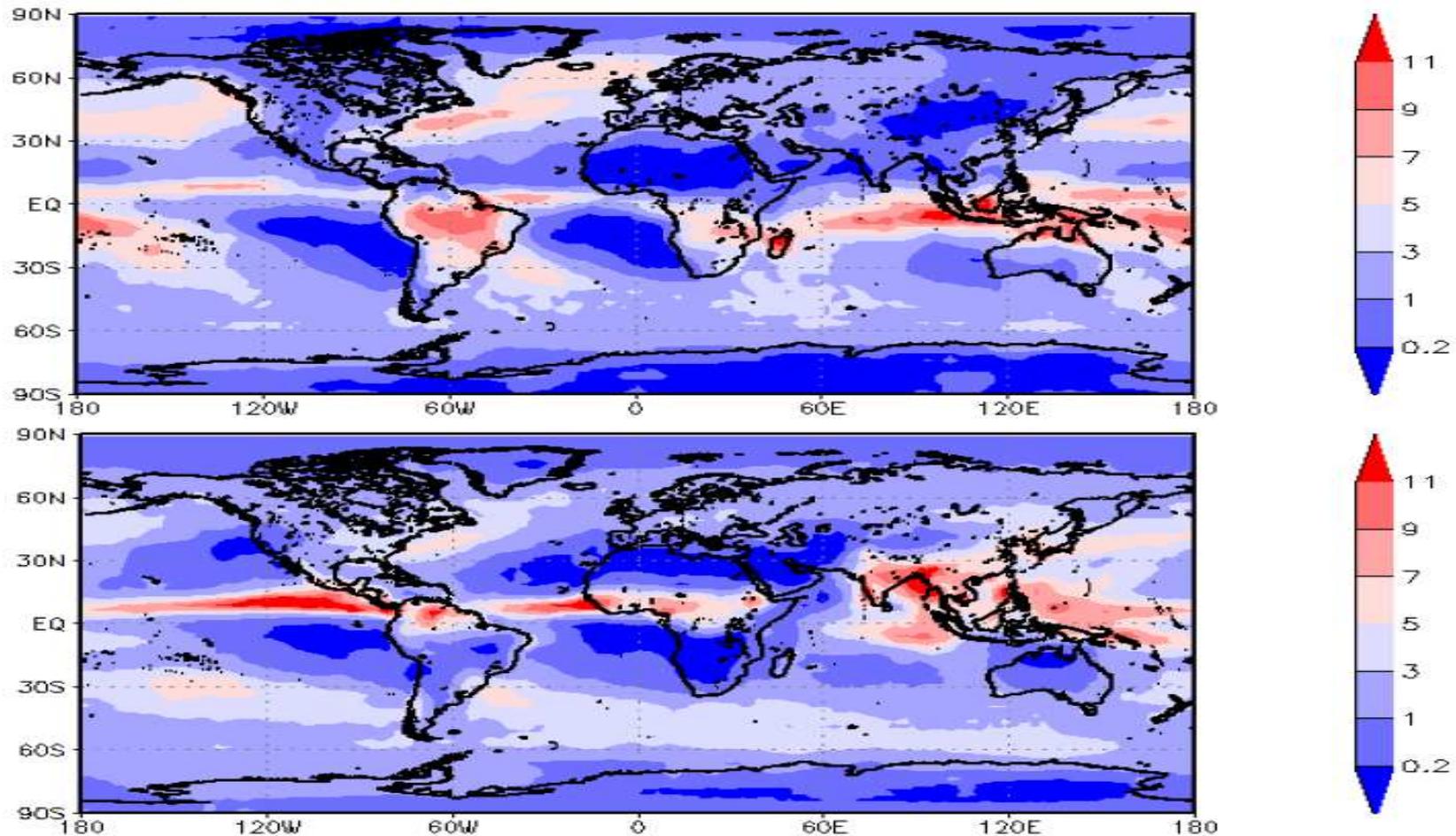


FIG. 3.22 – Champs de précipitation (mm par jour) moyenné sur la période 1979 et 2002 pour les mois de janvier et juillet (origine : projet GPCP).

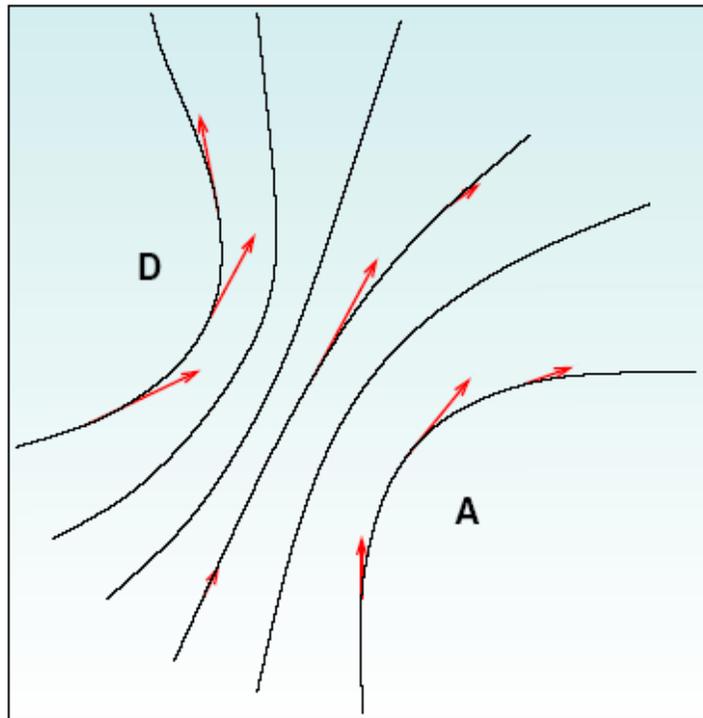
D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie



# Présentation à l'échelle du globe : superposition de champs moyens de géopotentiel et de vent

Sur ces champs moyens, on retrouve les caractéristiques de la règle de Buys-Ballot

Le météorologiste hollandais Christophorus Henricus Didericus Buys-Ballot (1817-1890) a déduit des observations météorologiques dont il disposait, que, dans l'hémisphère nord, le vent de grand échelle «tourne» dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour des zones de basse pression, et dans l'autre sens autour des zones anticycloniques : le vent est presque parallèle aux lignes isobares et il laisse les basses pressions à sa gauche, les hautes pressions à sa droite. Buys-Ballot a également remarqué que le vent est d'autant plus fort que les lignes isobares sont resserrées.



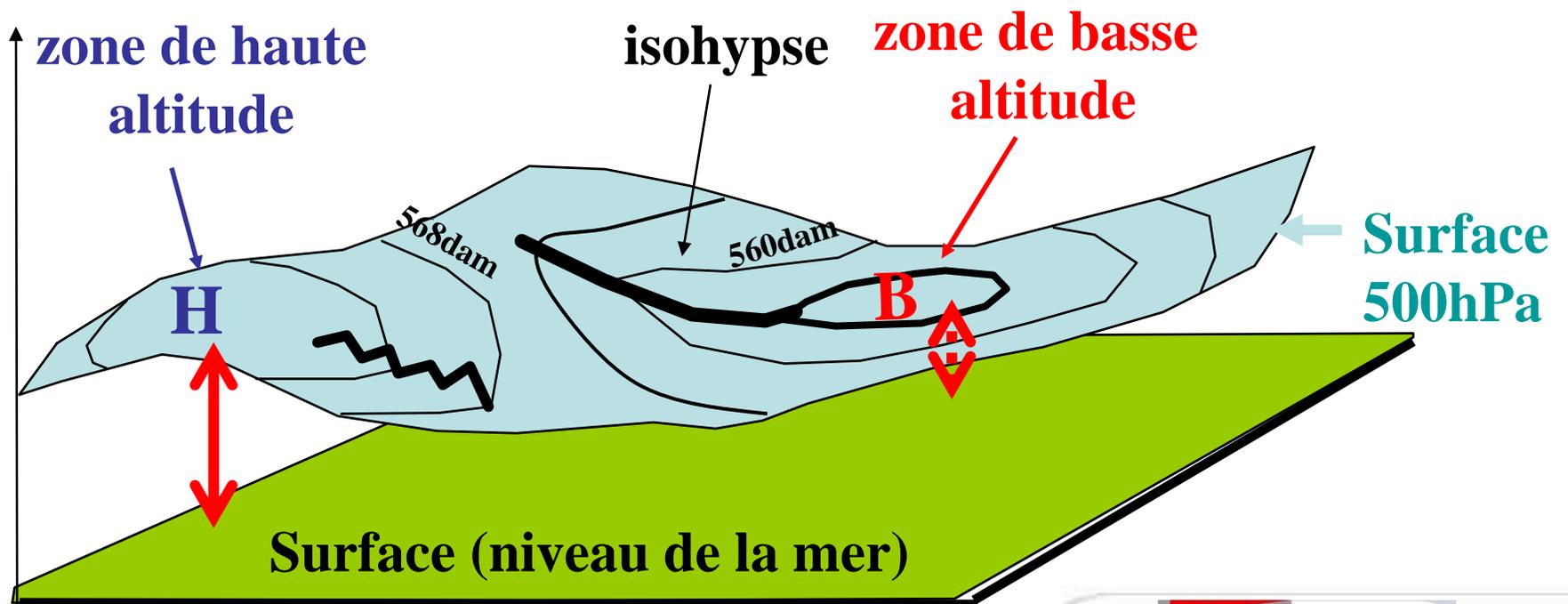
$$\vec{V}_g = \frac{1}{\rho_0 f} \vec{k} \times \vec{\nabla}_h(\tilde{P})$$

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

# CHAMPS DE PRESSION EN ALTITUDE

On représente les champs d'altitude des surfaces isobares ; les isolignes sont les courbes de niveau des surfaces isobares.  
(choix lié à l'utilisation de ces cartes par l'aéronautique).

Ces courbes de niveau s'appellent les **isohypses**.



# Géopotential et vent à 850 hPa

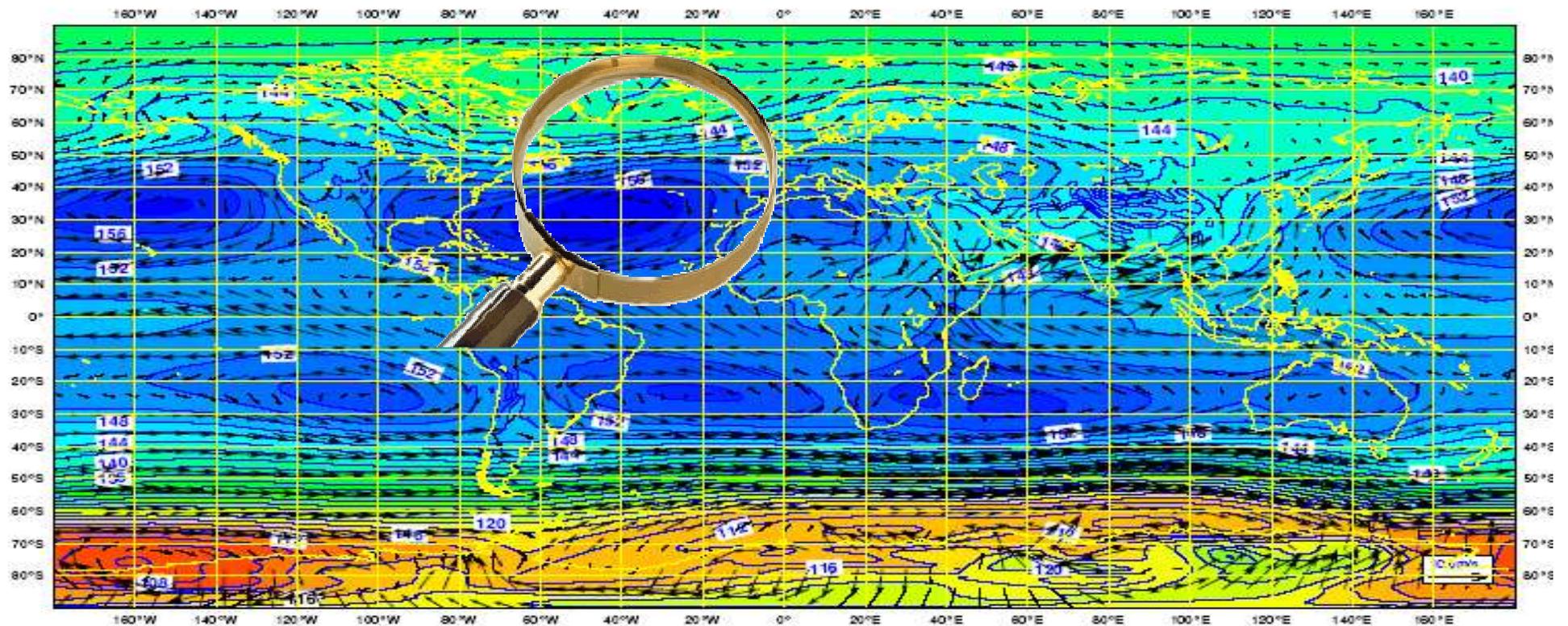
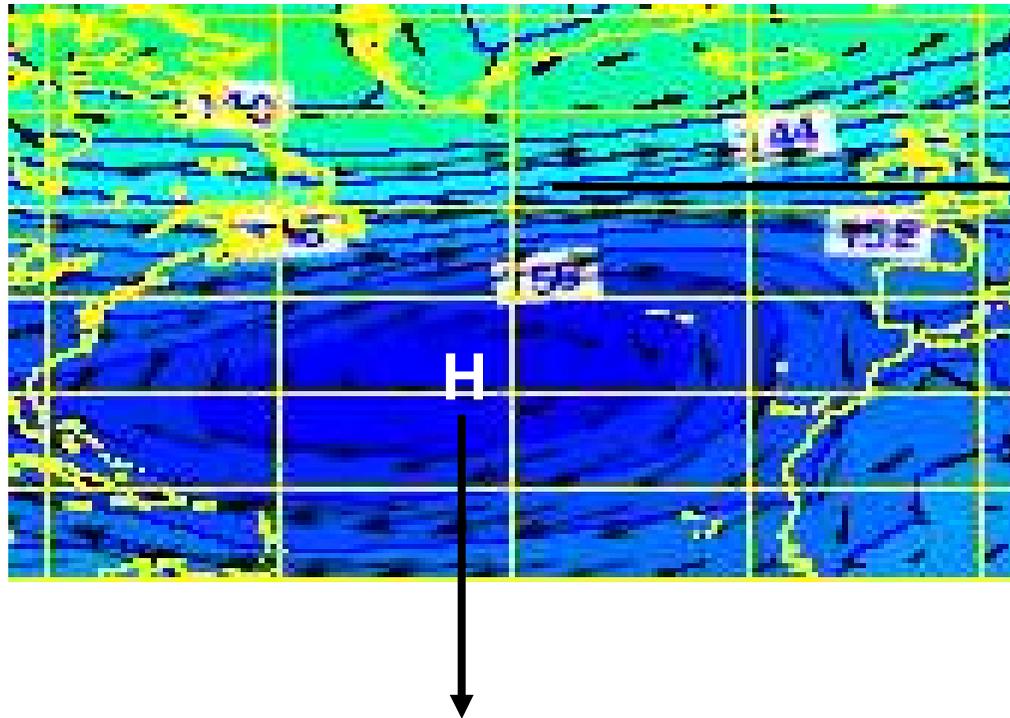


FIG. 3.23 – Champs de géopotential (Damgp) et de vent à 850 hPa moyenné sur les 44 ans de réanalyse ERA40 (a) décembre-janvier-février (b) juin-juillet-août

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

# Géopotential et vent à 850 hPa



Le vent est proportionnel au gradient de géopotential

Haut geopotential : le vent tourne dans le sens anticyclonique (cad horaire) autour du maximum de géopotential

# Présentation à l'échelle du globe : la tropopause

La tropopause peut-être diagnostiquée sur des critères plus rigoureux que la rupture de pente

- Concentration d'ozone
- Le champ de tourbillon potentiel (PV)
- Comparaison entre les diagnostics thermique, en ozone et en PV

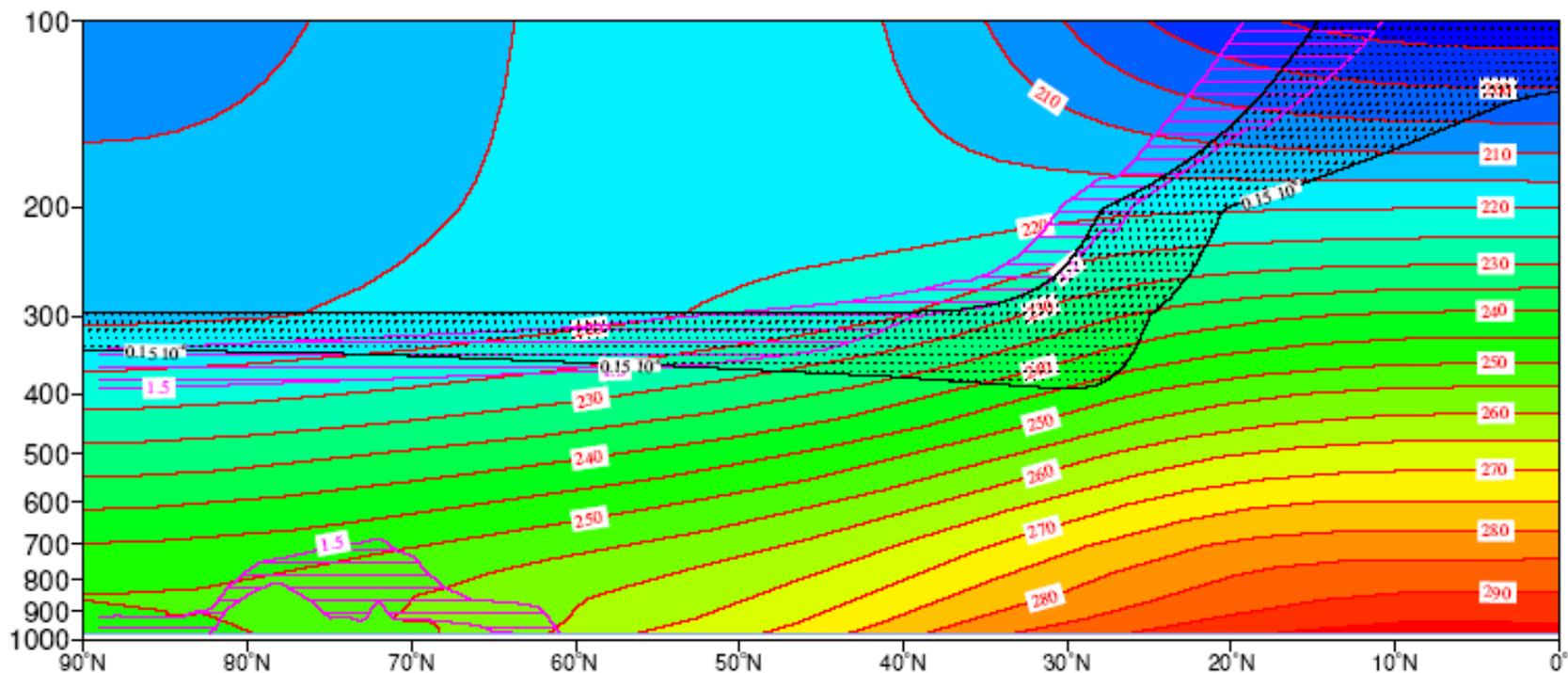
Le PV et l'ozone augmentent rapidement au dessus de la tropopause.

La tropopause peut-être diagnostiquée par l'iso-surface  $2.5 \cdot 10^{-7}$  kg d'ozone/ kg d'air ou sur l'iso-surface 1.5 ou 2 PVU

L'intérêt du PV est considérable :

1. C'est un paramètre quasi-conservatif càd qu'une particule de fluide peut-être identifiée et suivie par sa valeur de PV (le PV sert de traceur)
2. Le PV est un paramètre qui « condense l'information » et on peut en inversant le PV, connaissant les conditions aux limites, retrouver les autres champs (Z,P,T ...)

## La tropopause : diagnostic thermique, diagnostic en ozone, diagnostic en tourbillon potentiel



D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie

Comparaison entre le diagnostic thermique, le diagnostic en ozone et le diagnostic en tourbillon potentiel de la tropopause :

Champ de température (K) en moyenne zonale et saisonnière (décembre-janvier-février) auquel on a superposé la couche comprise entre 150 et 200 ppm (1 ppm =  $10^{-9}$  kg/kg) du rapport de mélange massique moyen d'ozone (noir) et la couche comprise en moyenne entre 1,5 et 2 PVU (magenta) pour la même saison.



# Présentation à l'échelle du globe : la tropopause

La valeur de 1.5 ou 2 PVU correspond à la surface étanche entre l'air stratosphérique et l'air troposphérique. On l'utilise pour repérer la tropopause ou pour tracer des champs sur la tropopause.

Exemple : le géopotential sur la tropopause

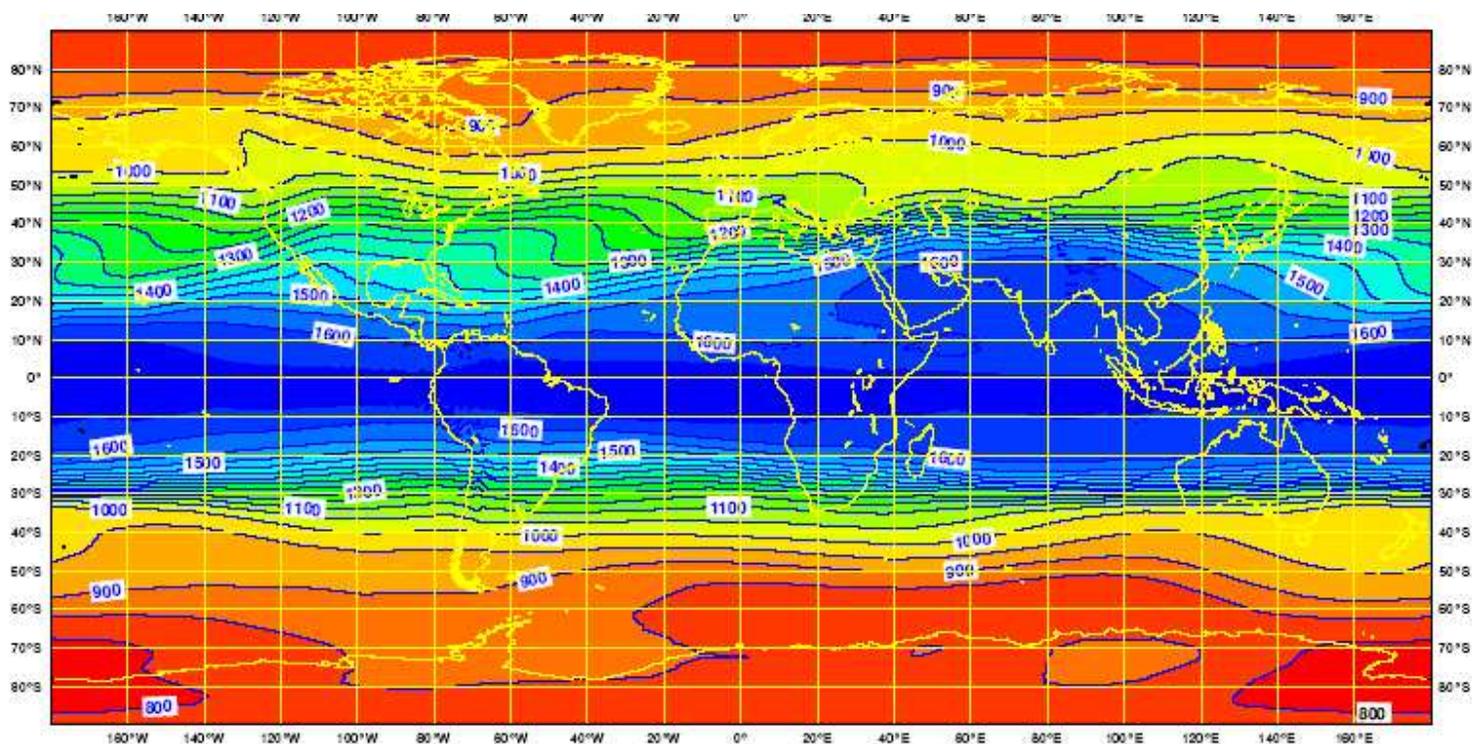


FIG. 3.29 – Champ de géopotential (en Dam) sur la surface 2 pvu moyennés sur les 44 ans de réanalyse ERA40 (a) décembre-janvier-février (b) juin-juillet-août

D'après : Malardel  
Fondamentaux de météorologie



INP  
TOULOUSE

ENM  
METEO FRANCE