

Modélisation climatique

Hubert Gallée

gallee@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

Grenoble 11 octobre 2010

Groupe Climat (LGGE)

Modèle: outil qui permet de décrire une situation de manière idéalisée (approximative).

1. Différents types de modèles

2. Construction d'un modèle atmosphérique

2.1. Dynamique de l'atmosphère

2.2. Les phénomènes sous-maillages

2.3. Forçage radiatif

2.4. Réponse des surfaces

3. Construction et utilisation de modèles climatiques

1. Différents types de modèles (1/3)

Modèles physiques



Maquette d'avion en soufflerie

1. Différents types de modèles ^(1/3)

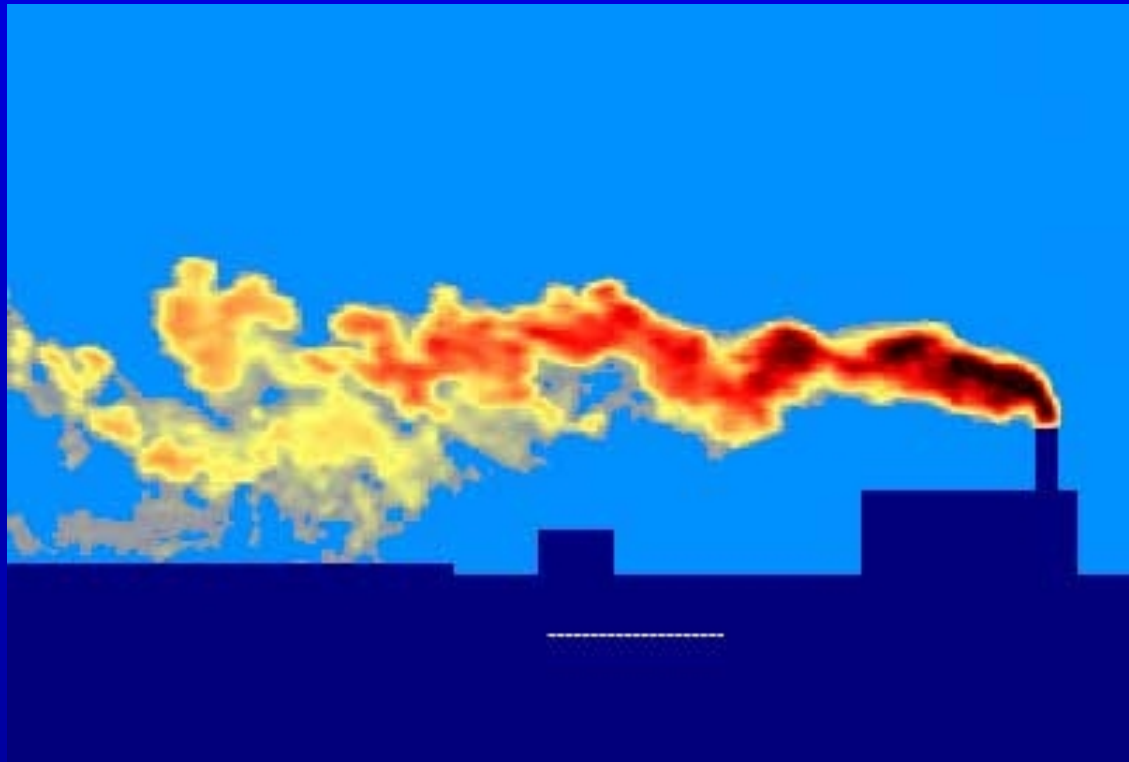
Modèles physiques



**Maquette de la vallée de Verrières
dans la veine hydraulique du CNRM,
avec le modèle du viaduc en construction**

1. Différents types de modèles (1/3)

Modèles physiques



**Simulation d'un panache d'un site industriel
dans la veine hydraulique du CNRM,**

2. Construction d'un modèle mathématique d'atmosphère

Écriture et résolution des équations de conservation des grandeurs à simuler,

Exemple: conservation de la quantité de mouvement
masse X accélération = somme des forces appliquées

Exemple: conservation de l'énergie
(premier principe de la thermodynamique):
Capacité calorifique X variation de température dans le temps =
travail appliqué + chauffage

2. Construction d'un modèle mathématique d'atmosphère

Pour l'atmosphère: grandeurs à simuler:

- La quantité de mouvement	→	Vitesse du vent
- L'énergie		Température
- L'eau sous forme vapeur	→	
- L'eau sous forme liquide		Nuages, pluie
- L'eau sous forme solide		Cristaux de glace, neige
- Aérosols	→	
	→	

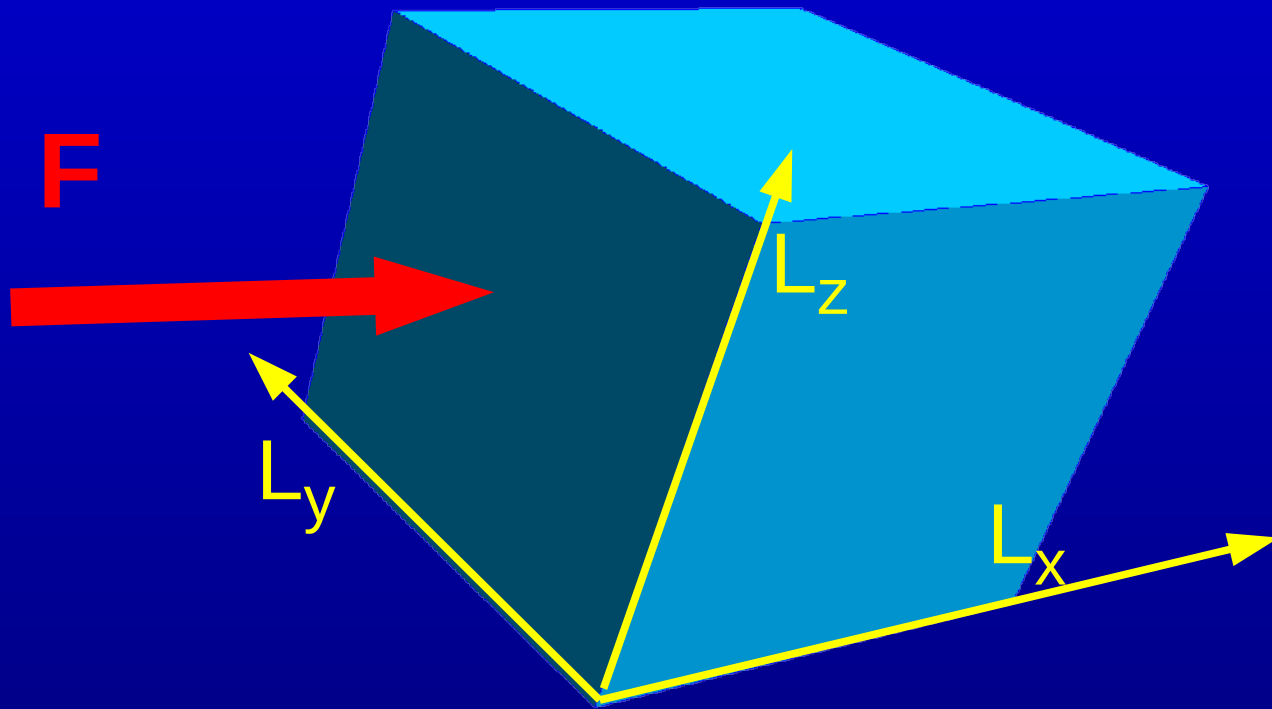
Pour le sol:

- L'énergie, l'eau ...

...

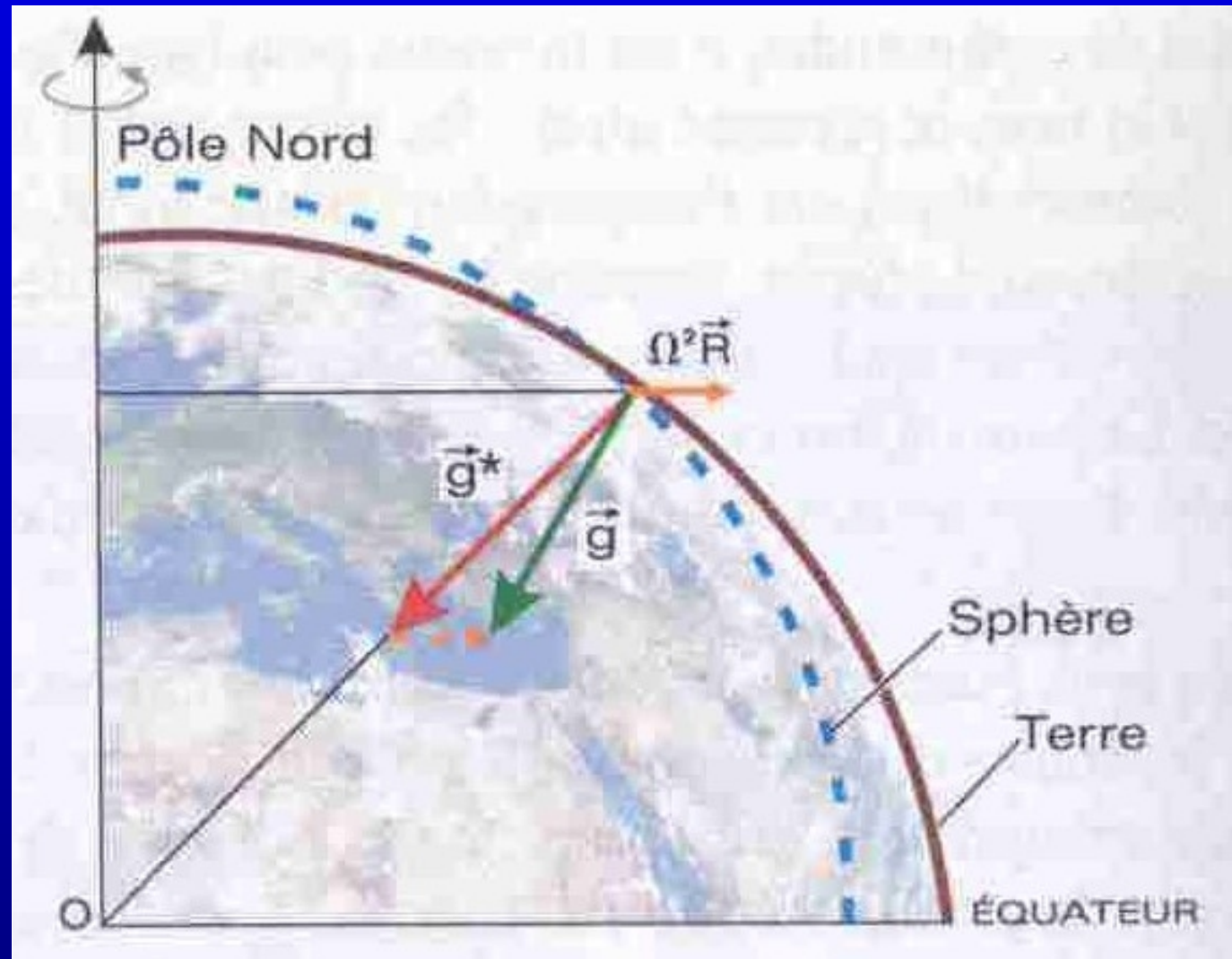
Conservation de la Quantité de Mouvement

$$\text{Masse: } M = \rho L_x L_y L_z$$

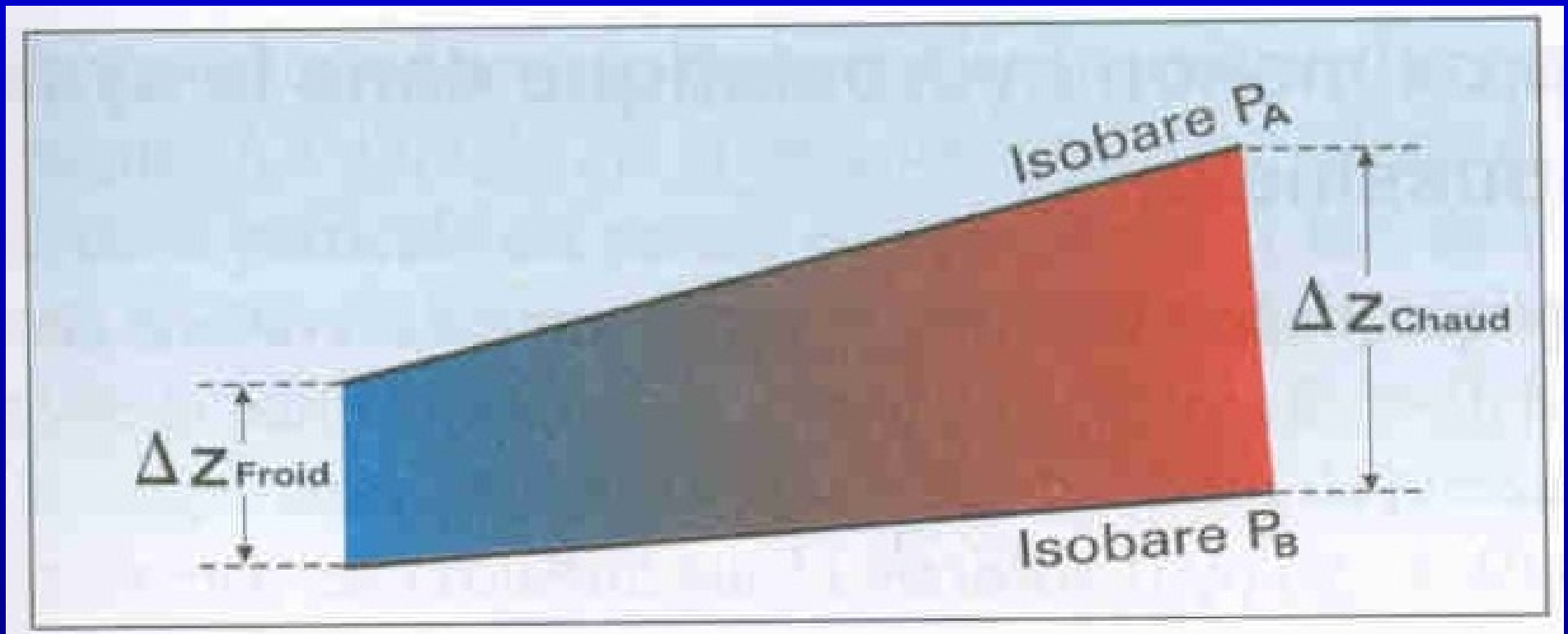


$$M \delta V = F \delta t$$

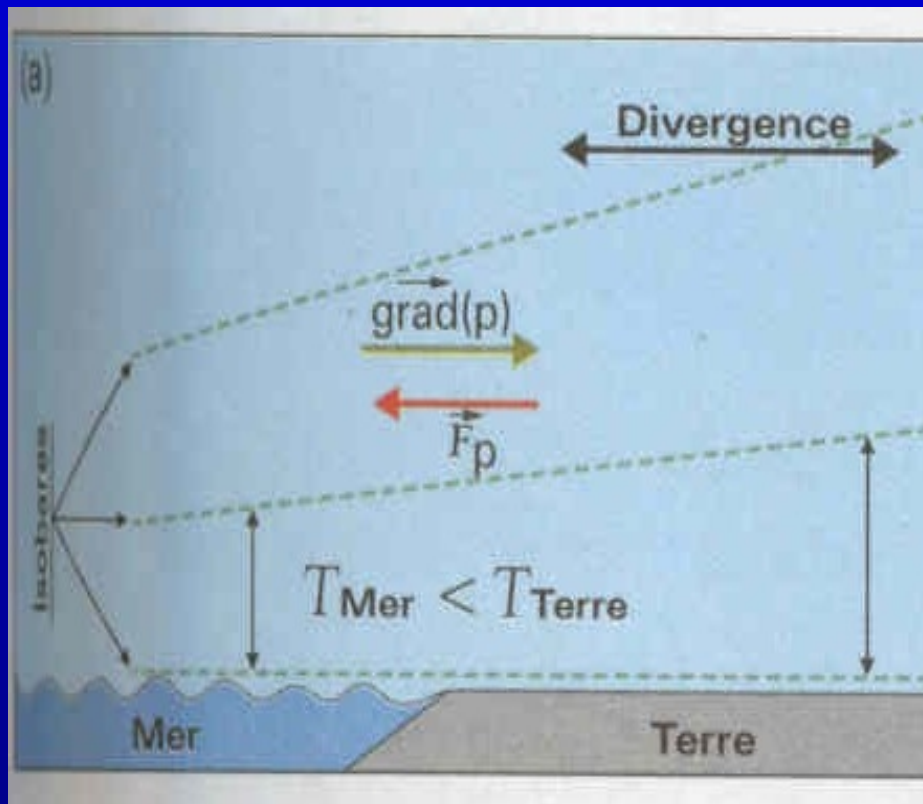
Force de gravité: $F = g$



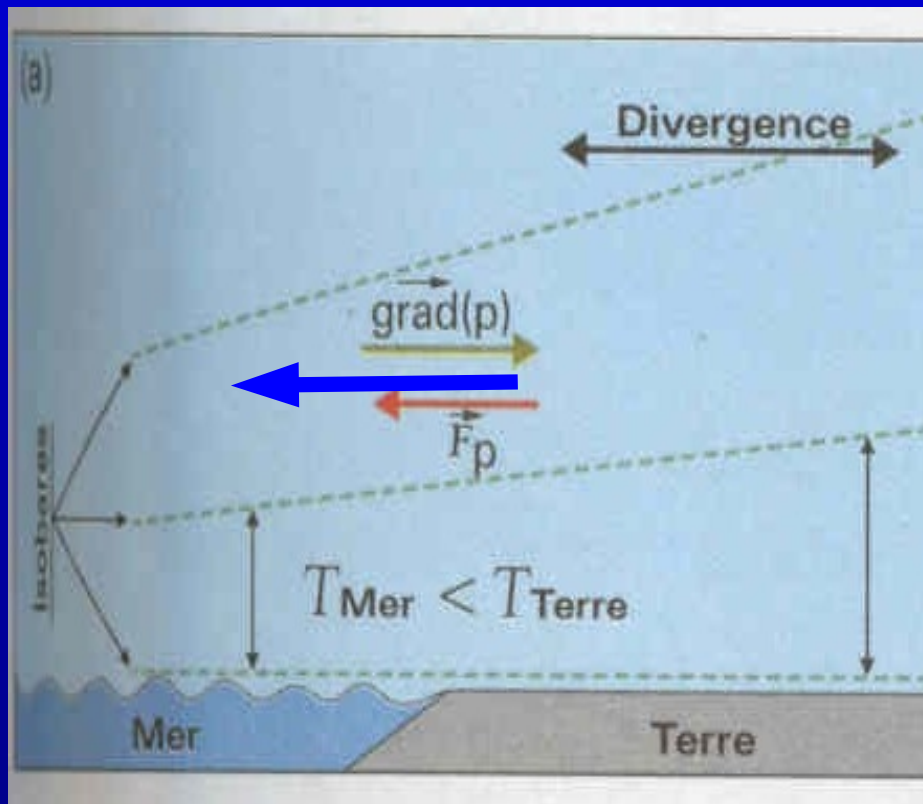
Les couches d'air
plus chaudes sont
moins denses et donc
plus épaisses



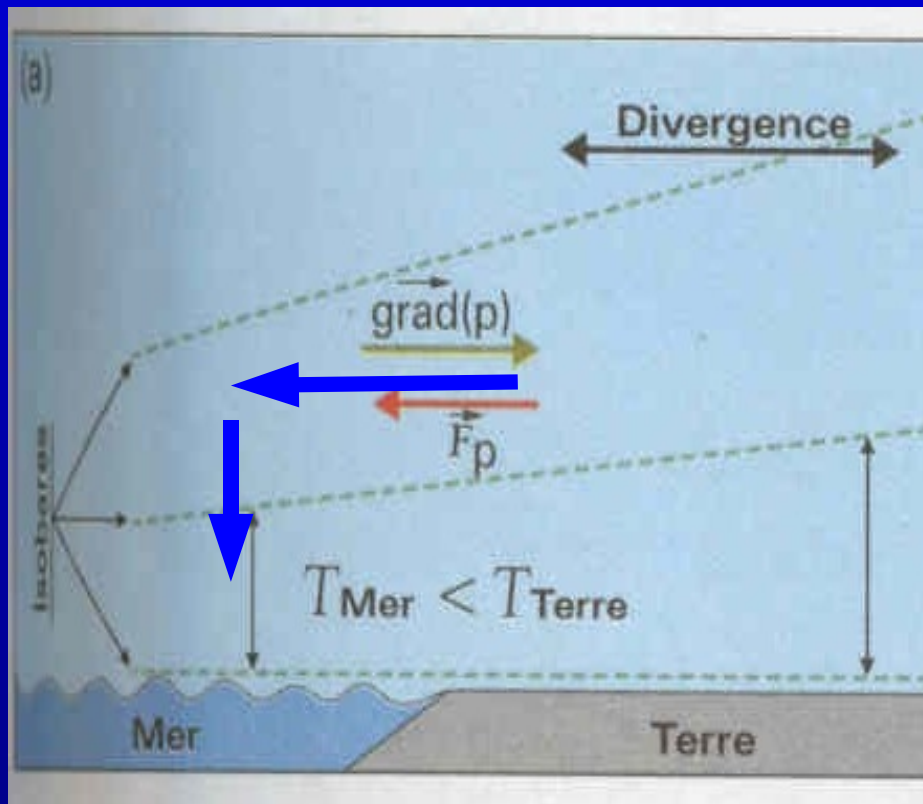
Gradient de pression et force associée



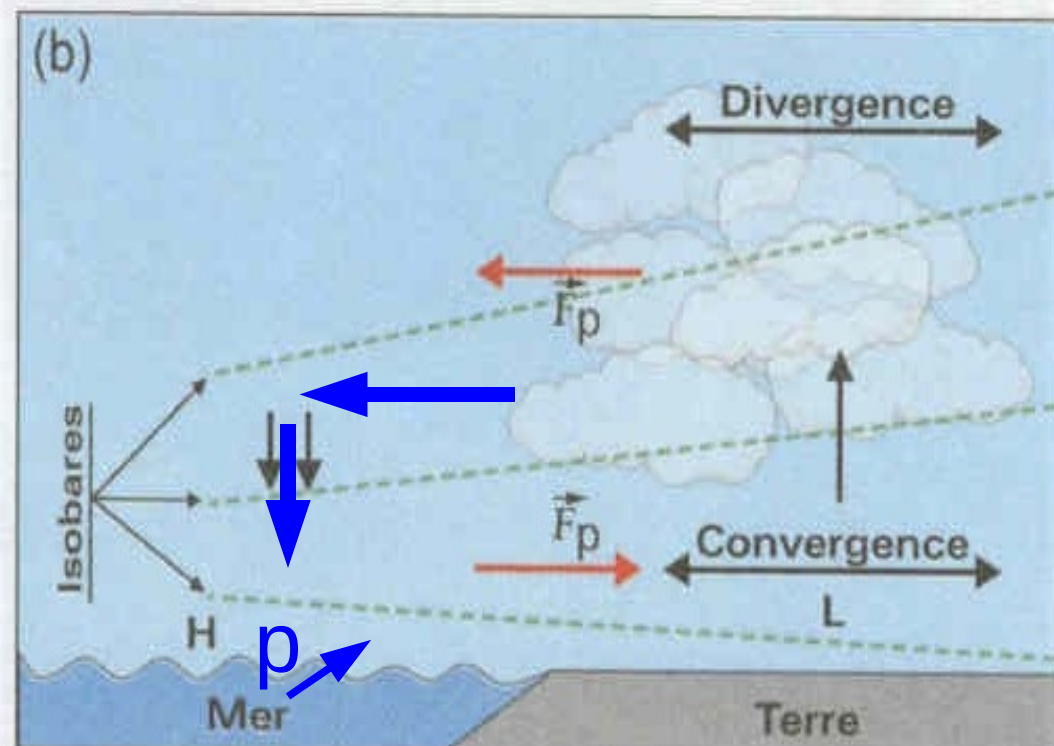
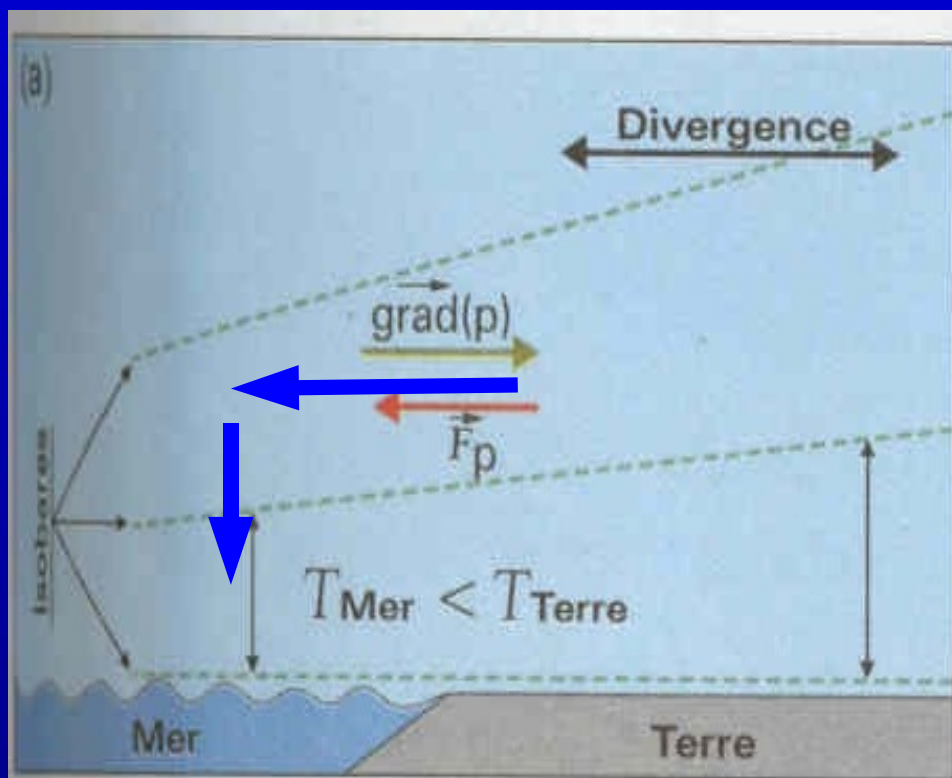
Gradient de pression et force associée



Gradient de pression et force associée

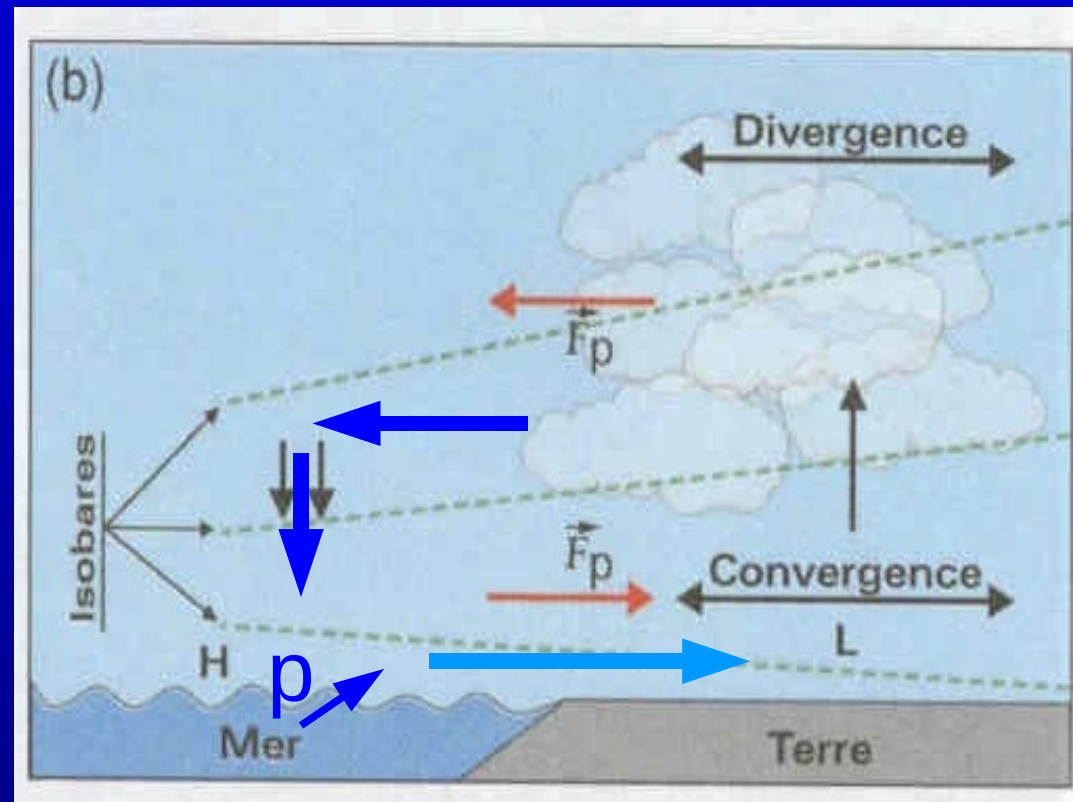


Gradient de pression et force associée

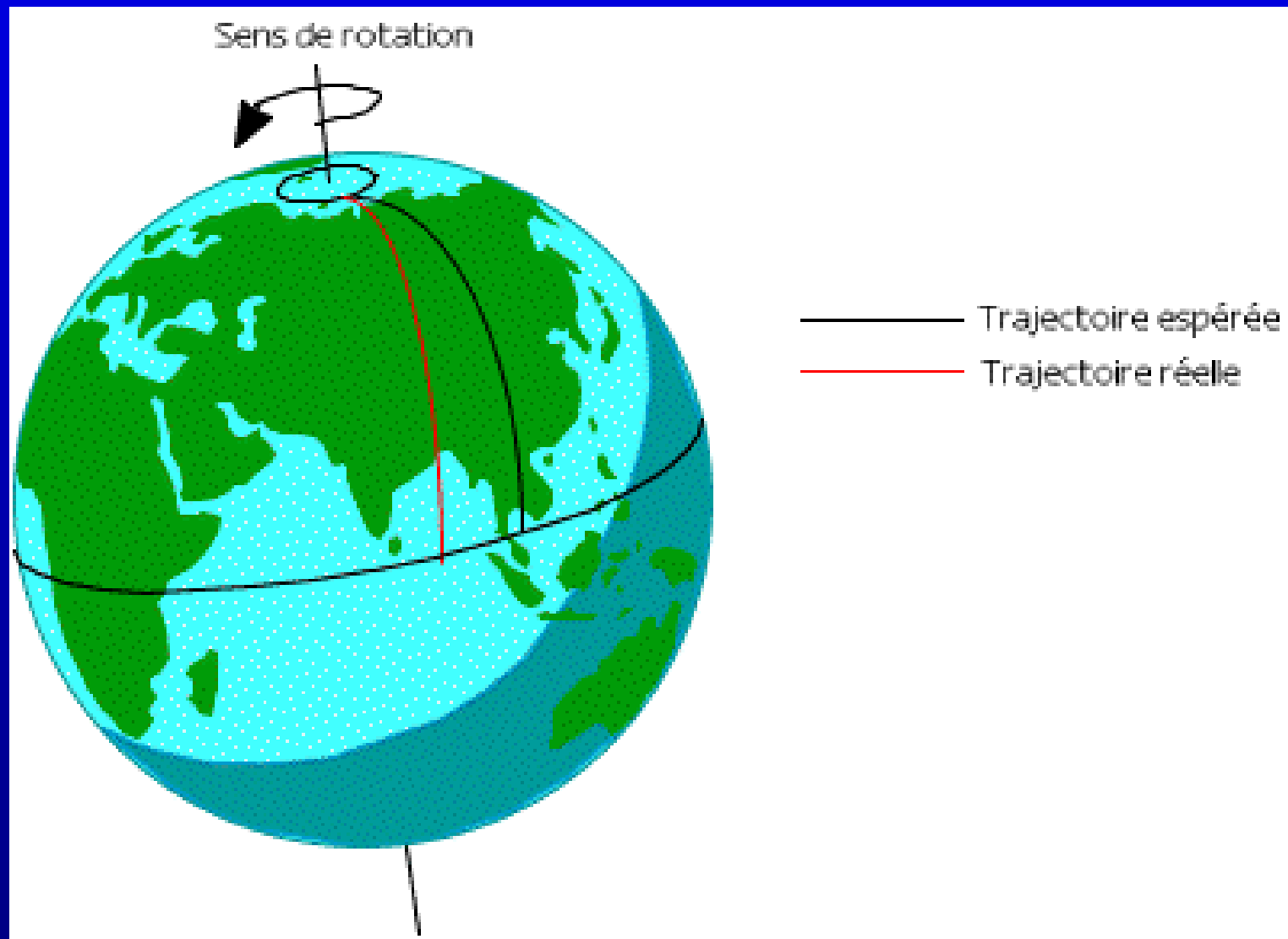


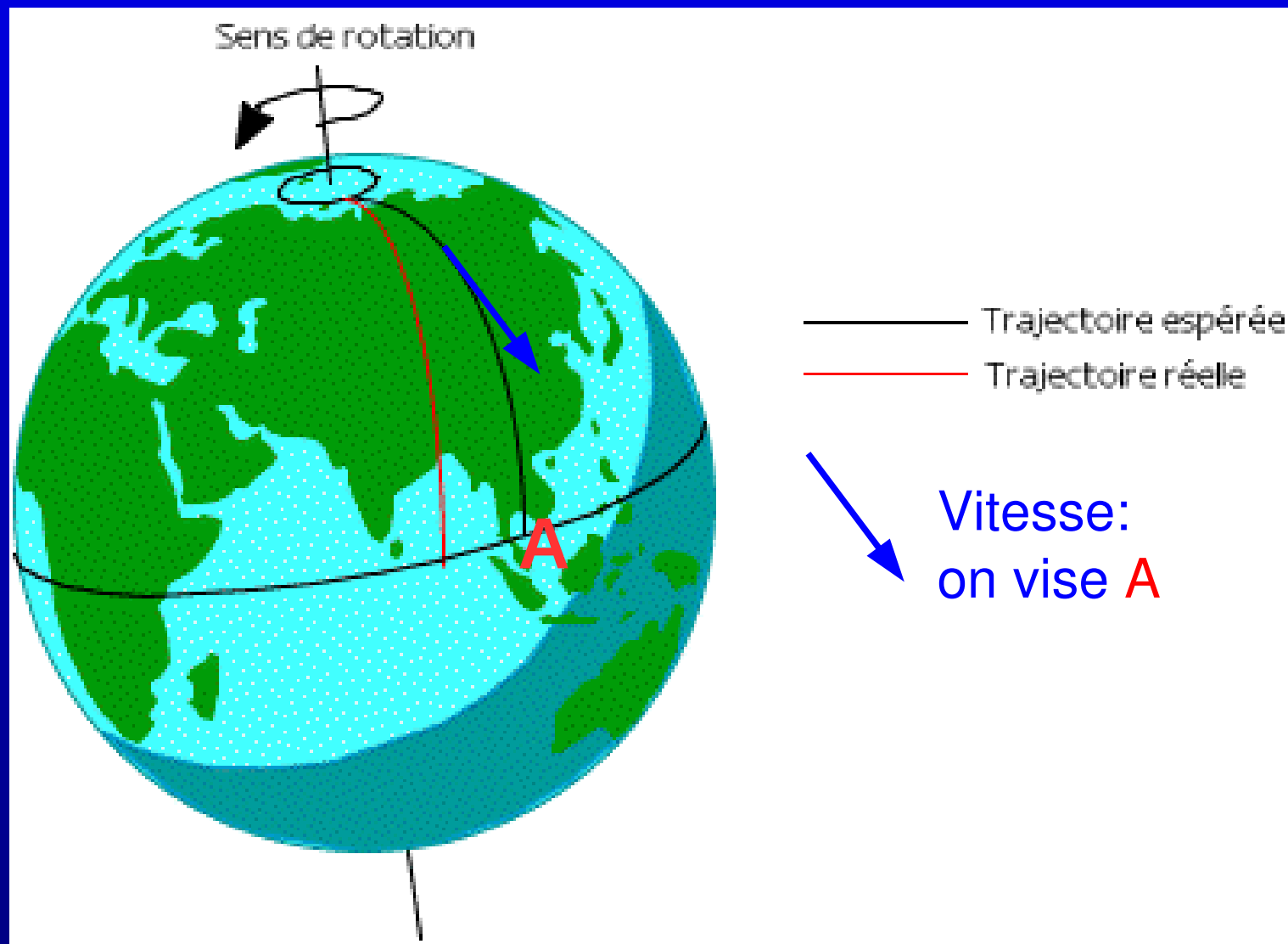
Gradient de pression et force associée

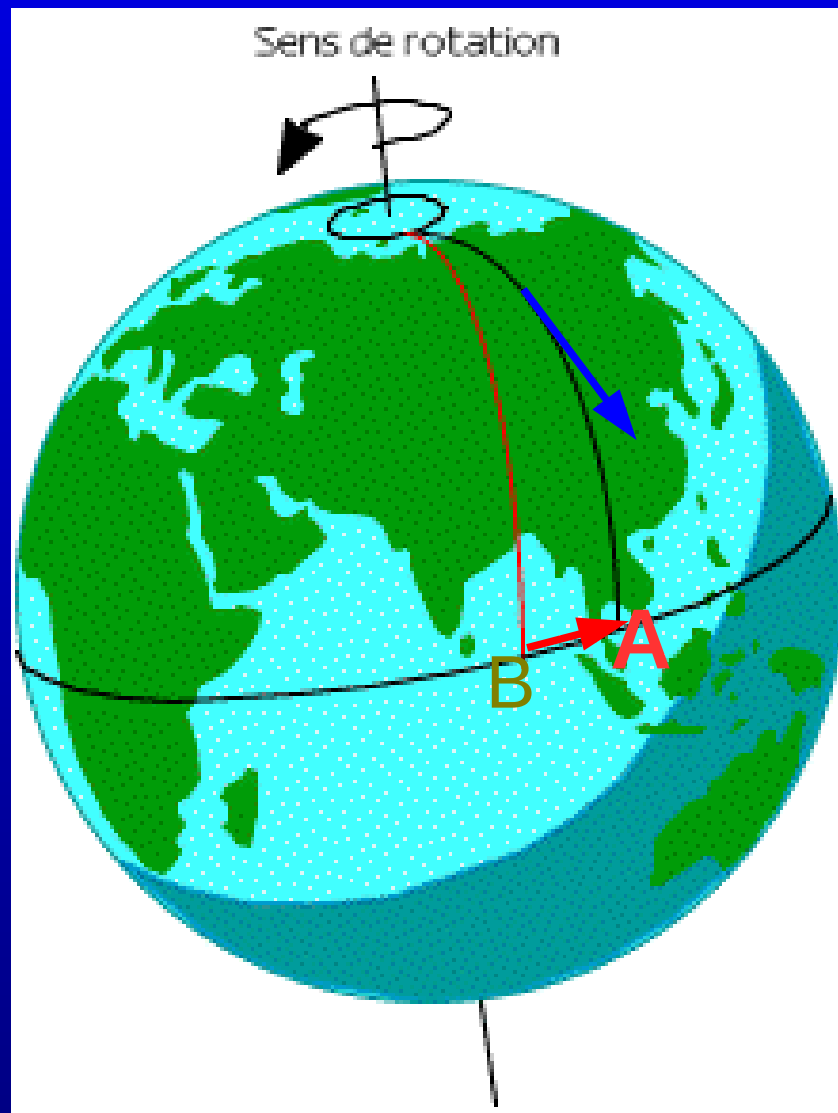
Brise de mer



Force de Coriolis







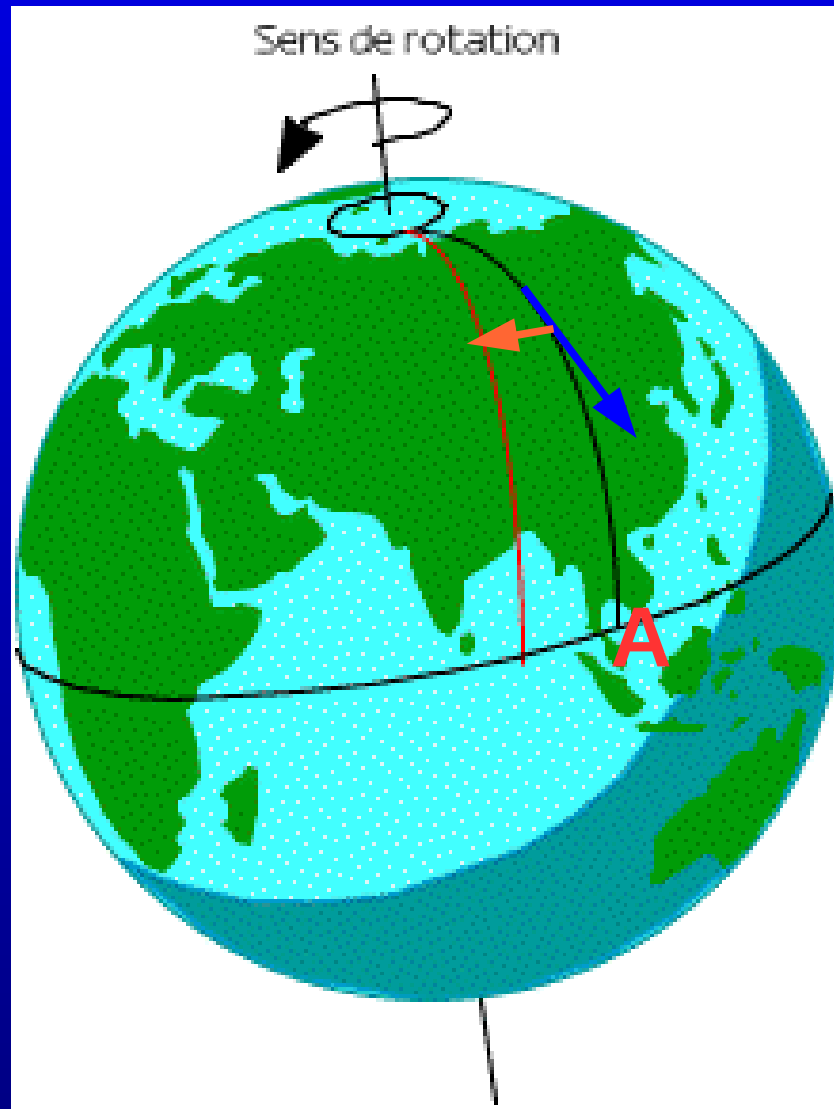
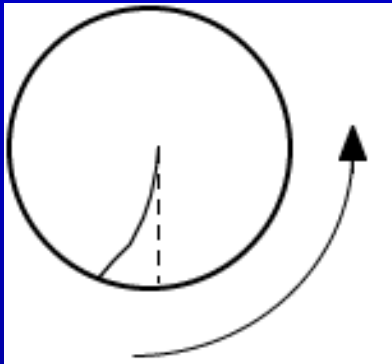
Sens de rotation

— Trajectoire espérée
— Trajectoire réelle

→ Rotation de la Terre durant le trajet vers A

==>

on arrive en B

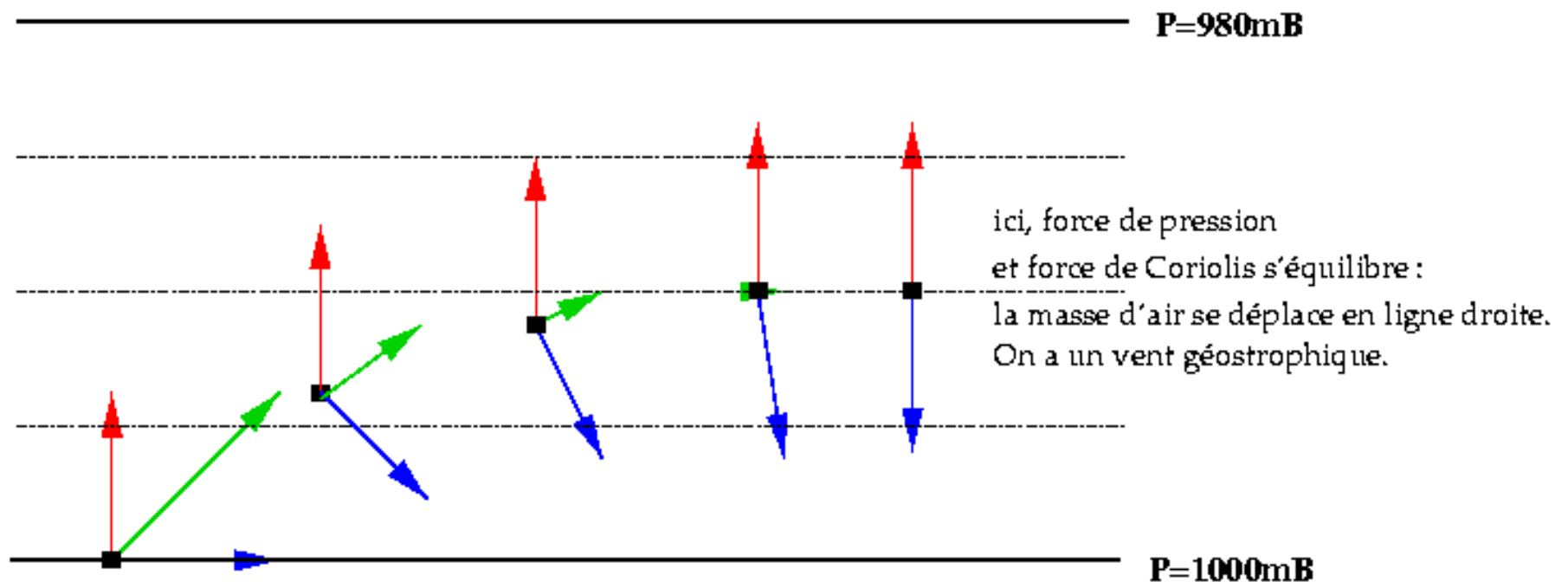


— Trajectoire espérée
— Trajectoire réelle

← Effet net:
force de
Coriolis

Force de Coriolis et Vent géostrophique

Formation d'un vent géostrophique



—▶ Force de pression —▶ Force de Coriolis —▶ Résultante

Nord



Ouest



Est



Sud

Nord

Ouest

Est

+

Perturbation du champs de température

Sud



Nord

Ouest

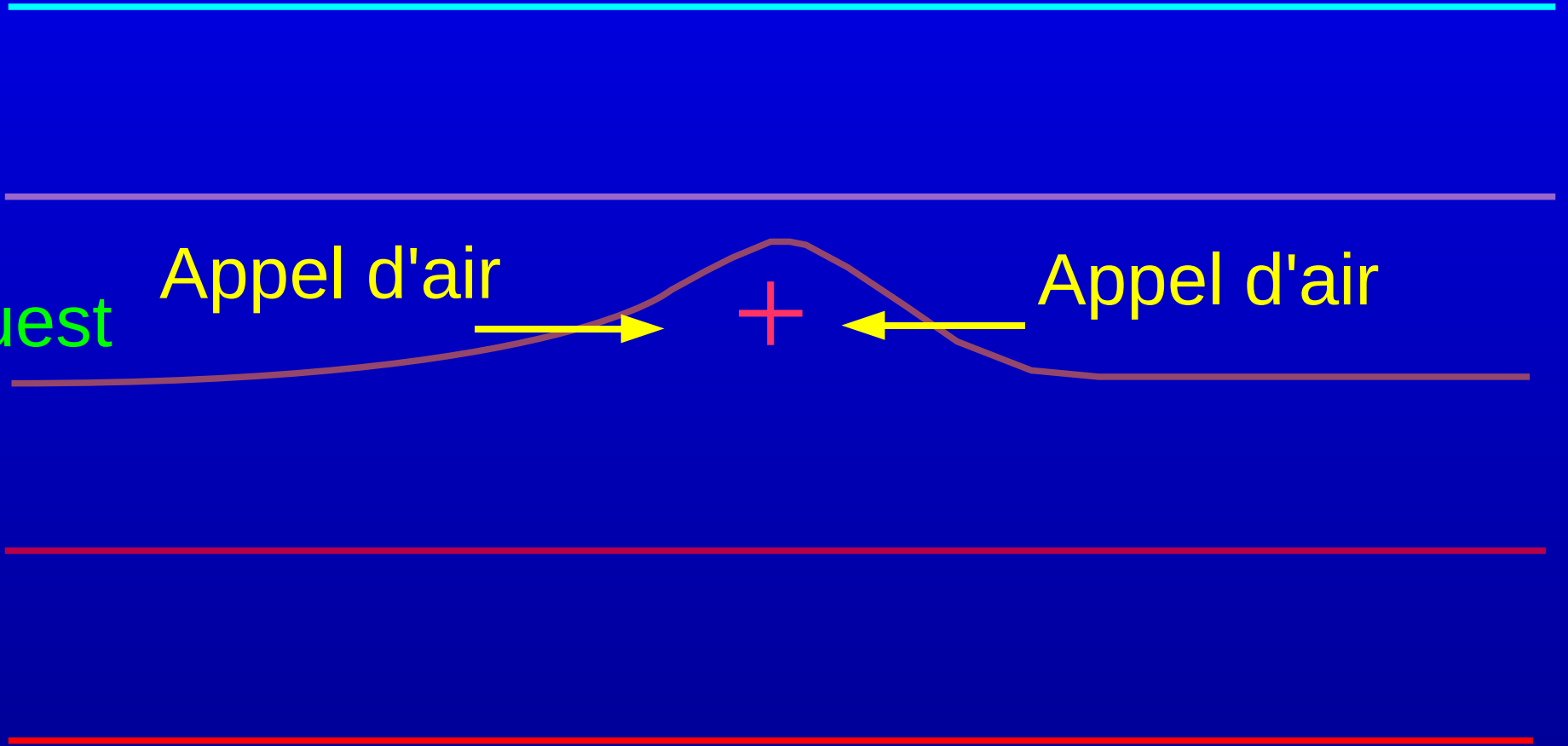
Appel d'air



Appel d'air

Est

Sud



Nord

Ouest

Appel d'air



Appel d'air

Est



Vent résultant

Sud

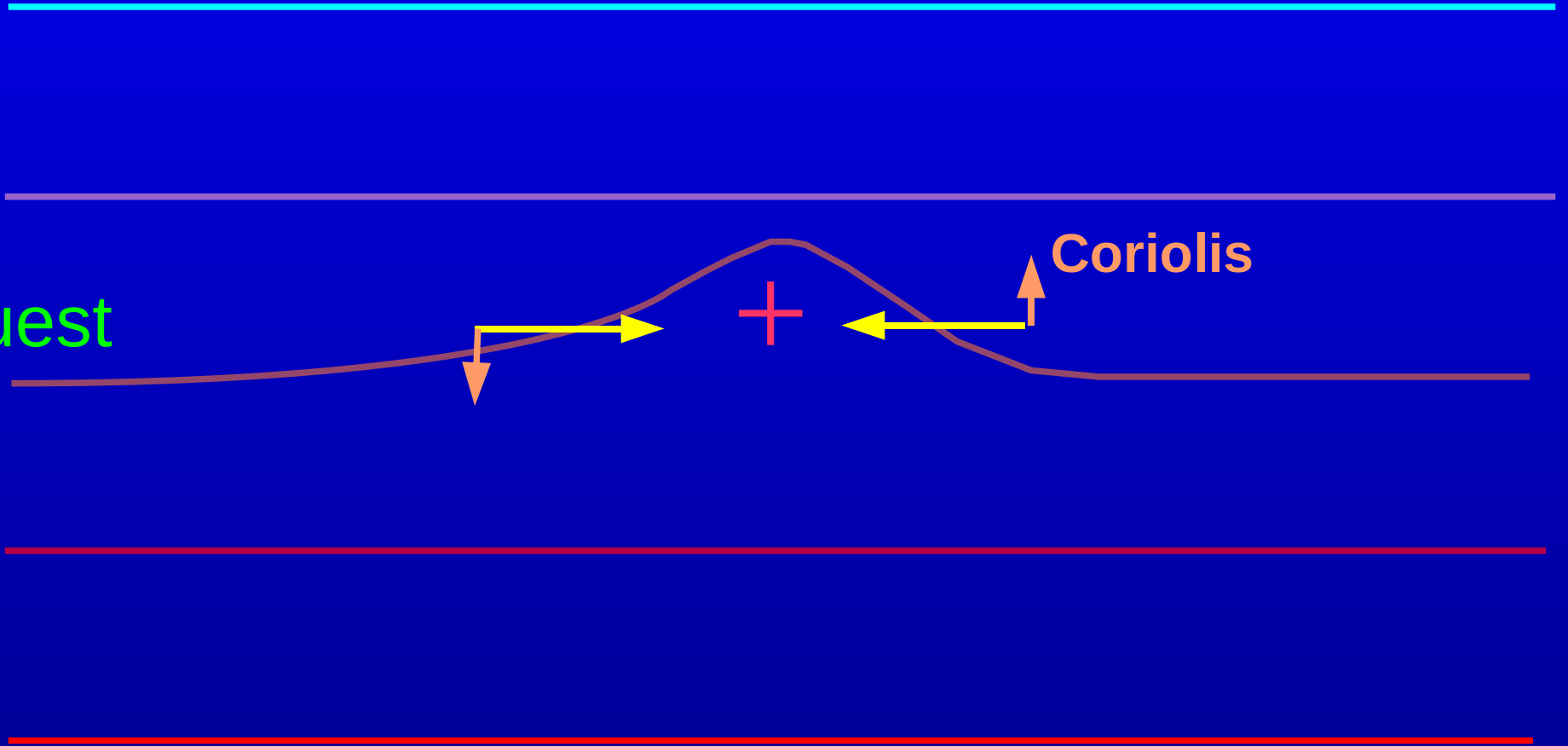
Nord

Ouest

Est

Coriolis

Sud

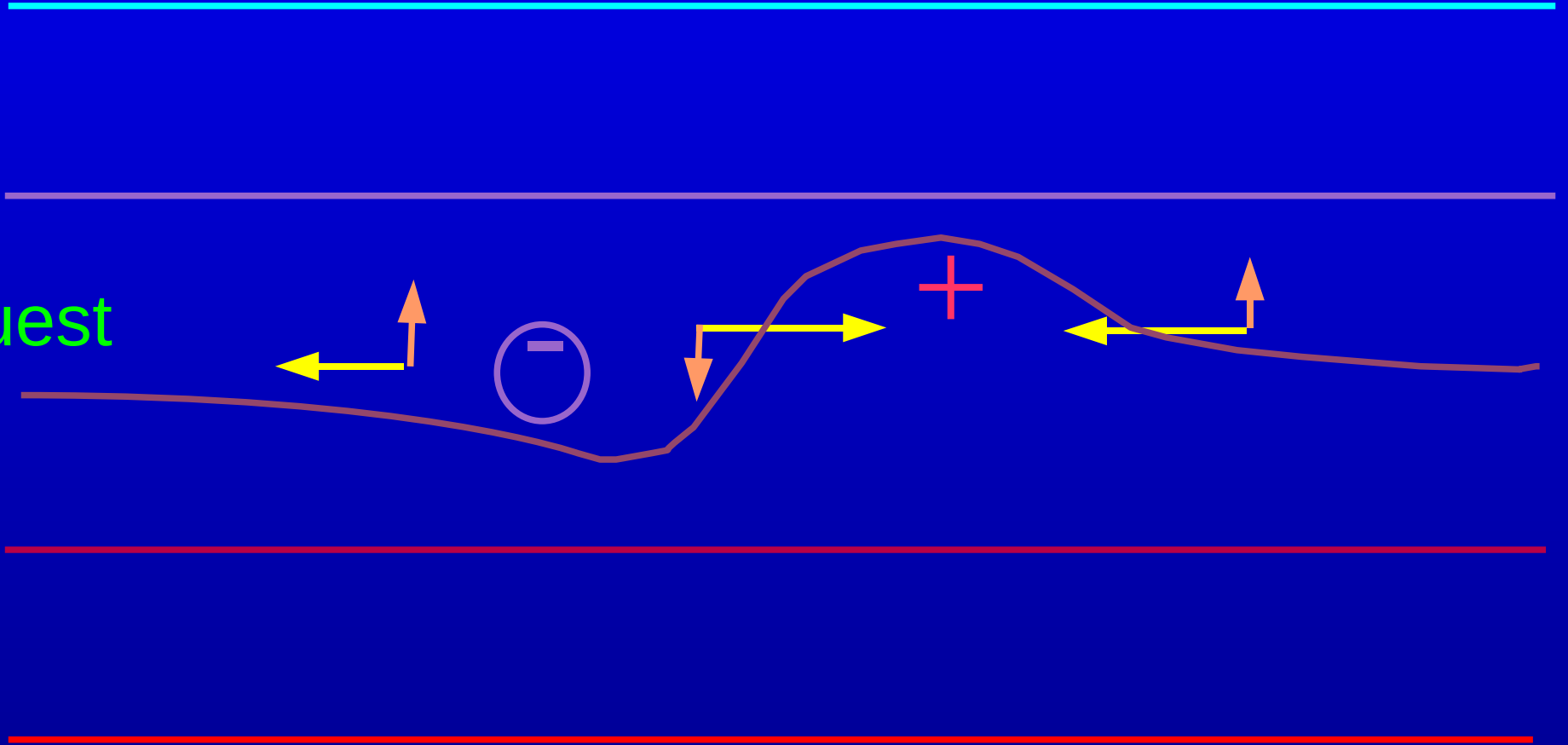


Nord

Ouest

Est

Sud

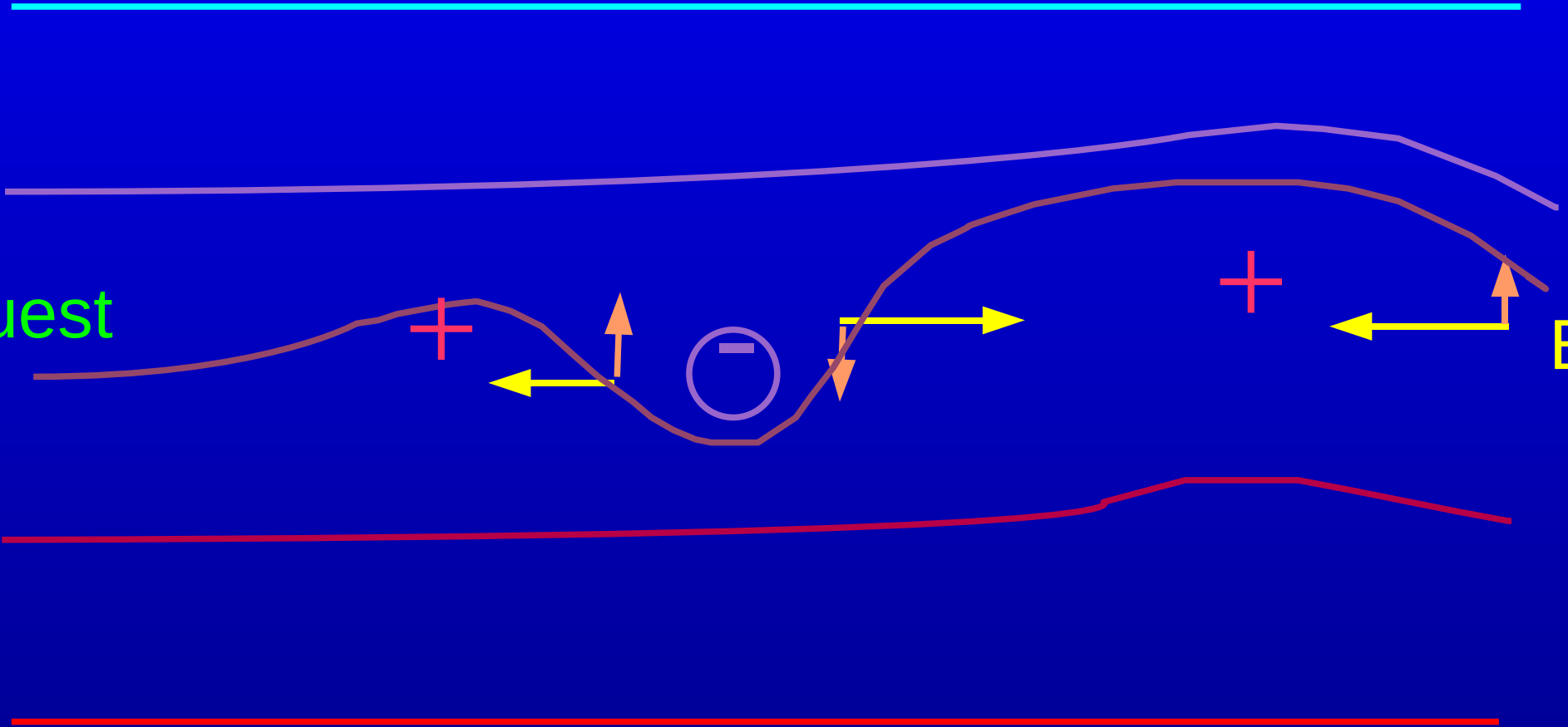


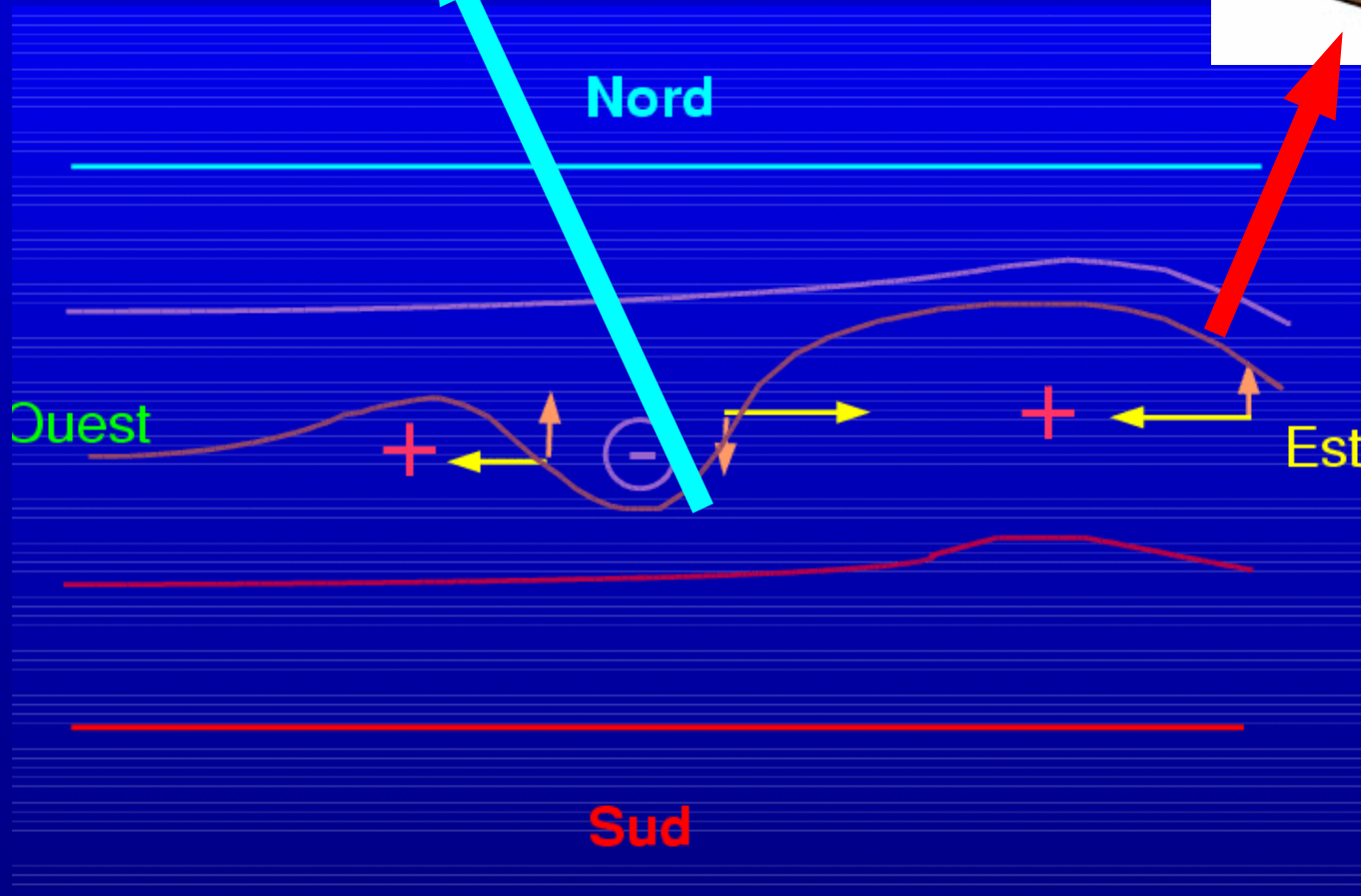
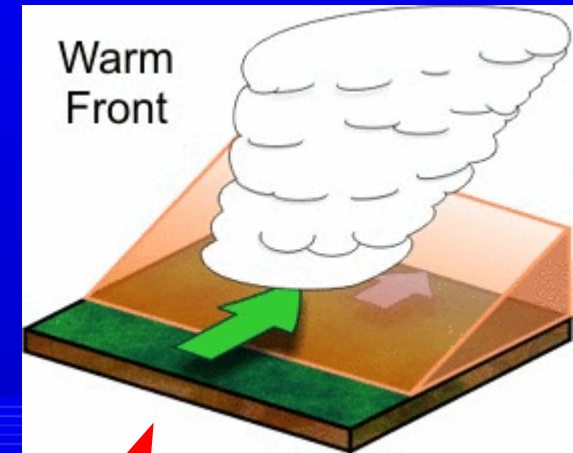
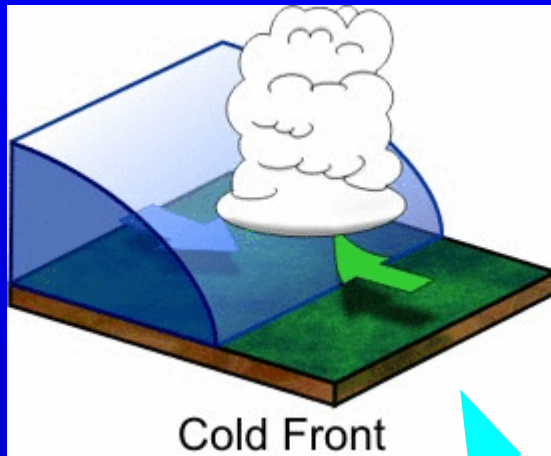
Nord

Ouest

Est

Sud





Equations

Les équations primitives

*atmosphériques,
en coordonnées de pression*

$$+ \text{ Dynamique : } \begin{cases} \frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{\partial\phi}{\partial x} + F_x \\ \frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{\partial\phi}{\partial y} + F_y \end{cases}$$

$$+ \text{ Hydrostatique : } 0 = -\frac{\partial\phi}{\partial p} - \frac{RT}{p}$$

(+ gaz parfait)

$$+ \text{ Continuité : } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

$$+ \text{ Energie : } \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + \omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} + \frac{RT}{p c_p} \right) = \frac{J}{c_p}$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p}$$

f paramètre de Coriolis

$\phi \simeq gz$ géopotentiel

F_x, F_y friction

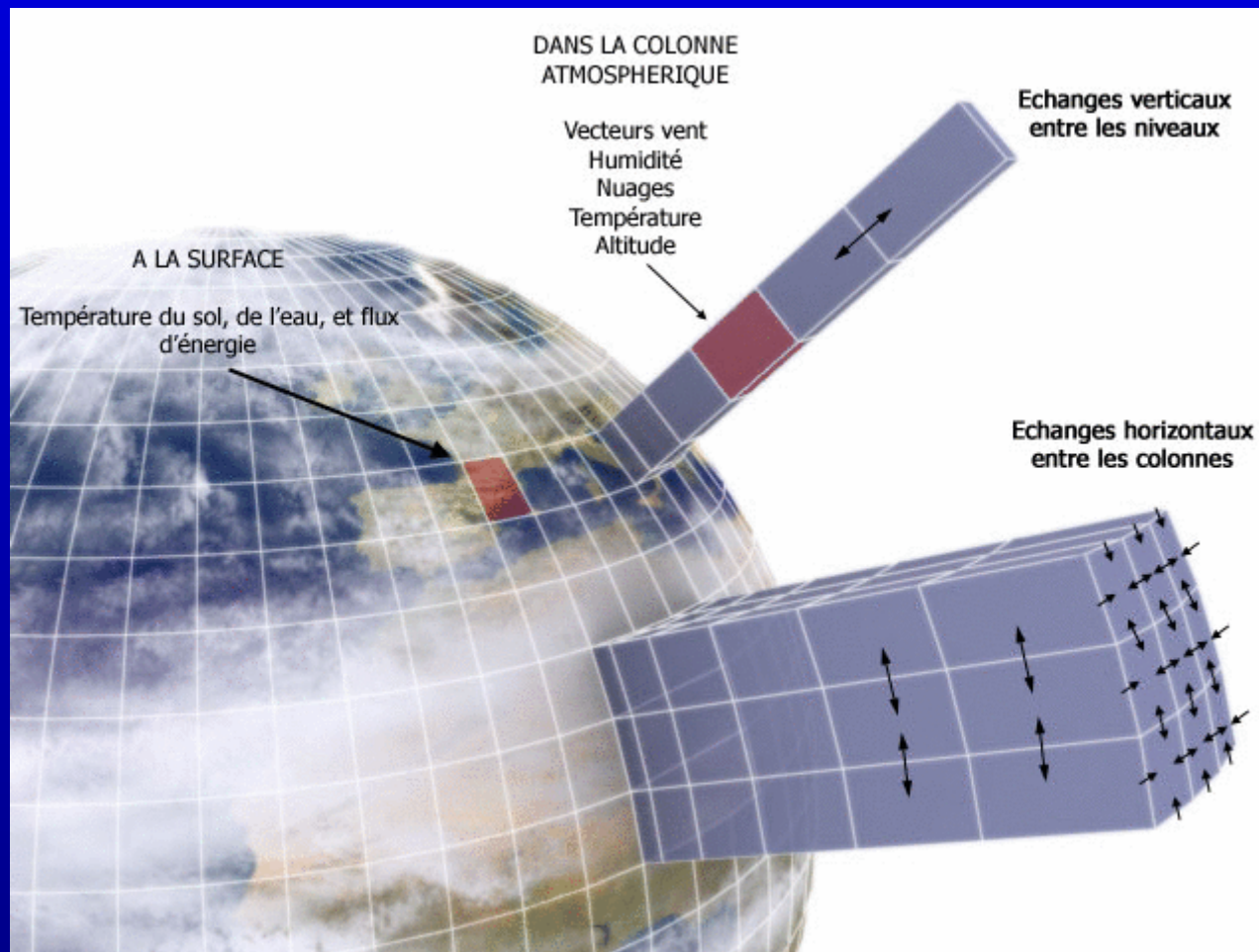
J chauffage

Nécessité d'une solution numérique

Motivation (pour la modélisation de l'atmosphère)

- Obligation d'écrire les équations pour chaque parcelle d'air
 - Dépendance par rapport aux
 - aux 3 dimensions spatiales
 - au temps
 - Il n'existe pas de solution analytique aux équations
 - Résolution des équations sur un maillage

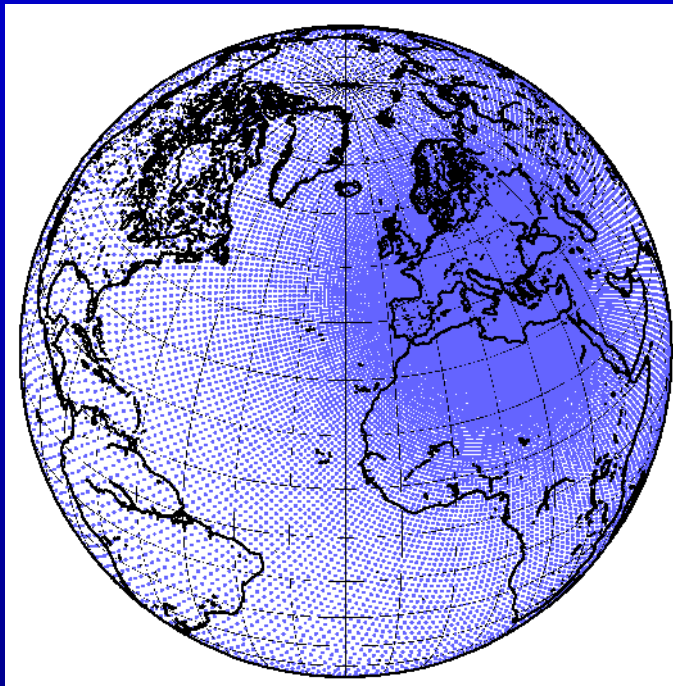
La grille numérique



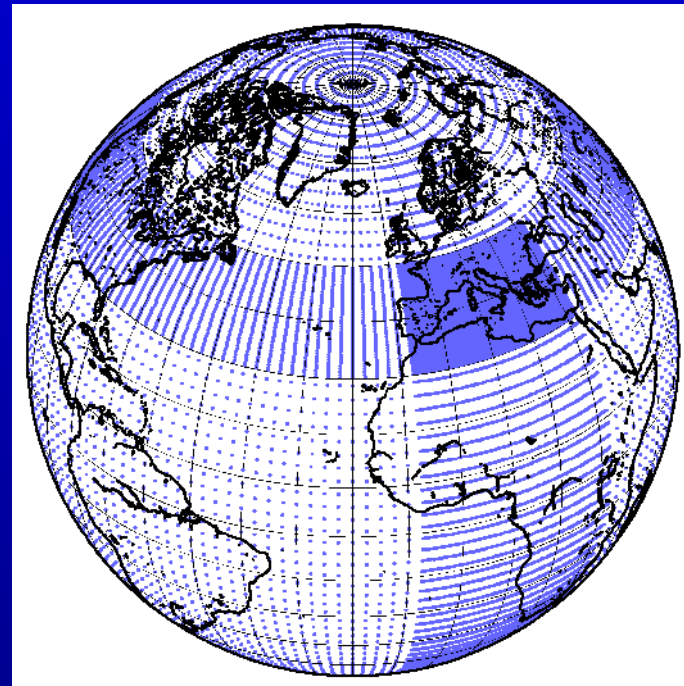
Grilles à pas variable

Modèles atmosphériques à maillage étiré

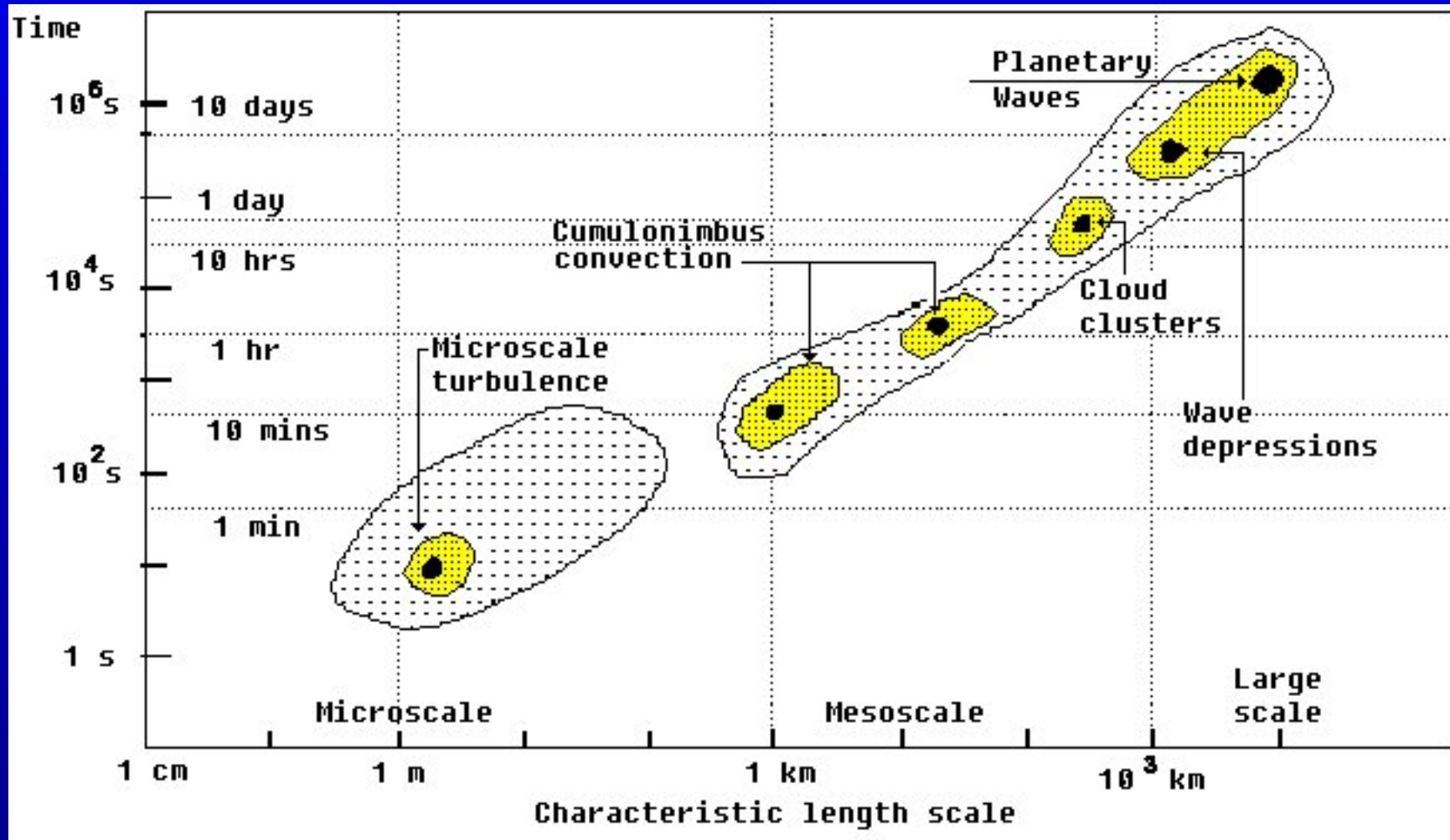
ARPEGE-Climat
(Météo-France)



LMDZ
(IPSL/LMD)



Échelles du mouvement atmosphérique



Phénomènes sous-maille

phénomènes de taille trop petite
pour être représentés sur plusieurs mailles du modèle



représentation simplifiée du phénomène
(paramétrisation)

exemple:

- nuages
- turbulence atmosphérique

Phénomènes sous-maille

Challenges

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p}$$

Problèmes numériques

«Dynamique»

+ Dynamique :

$$\begin{cases} \frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + F_x \\ \frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - F_y \end{cases}$$

Friction

Surface

+ Energie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + \omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} + \frac{RT}{p c_p} \right) - \frac{J}{c_p} = \text{Chauffage}$$

Chauffage

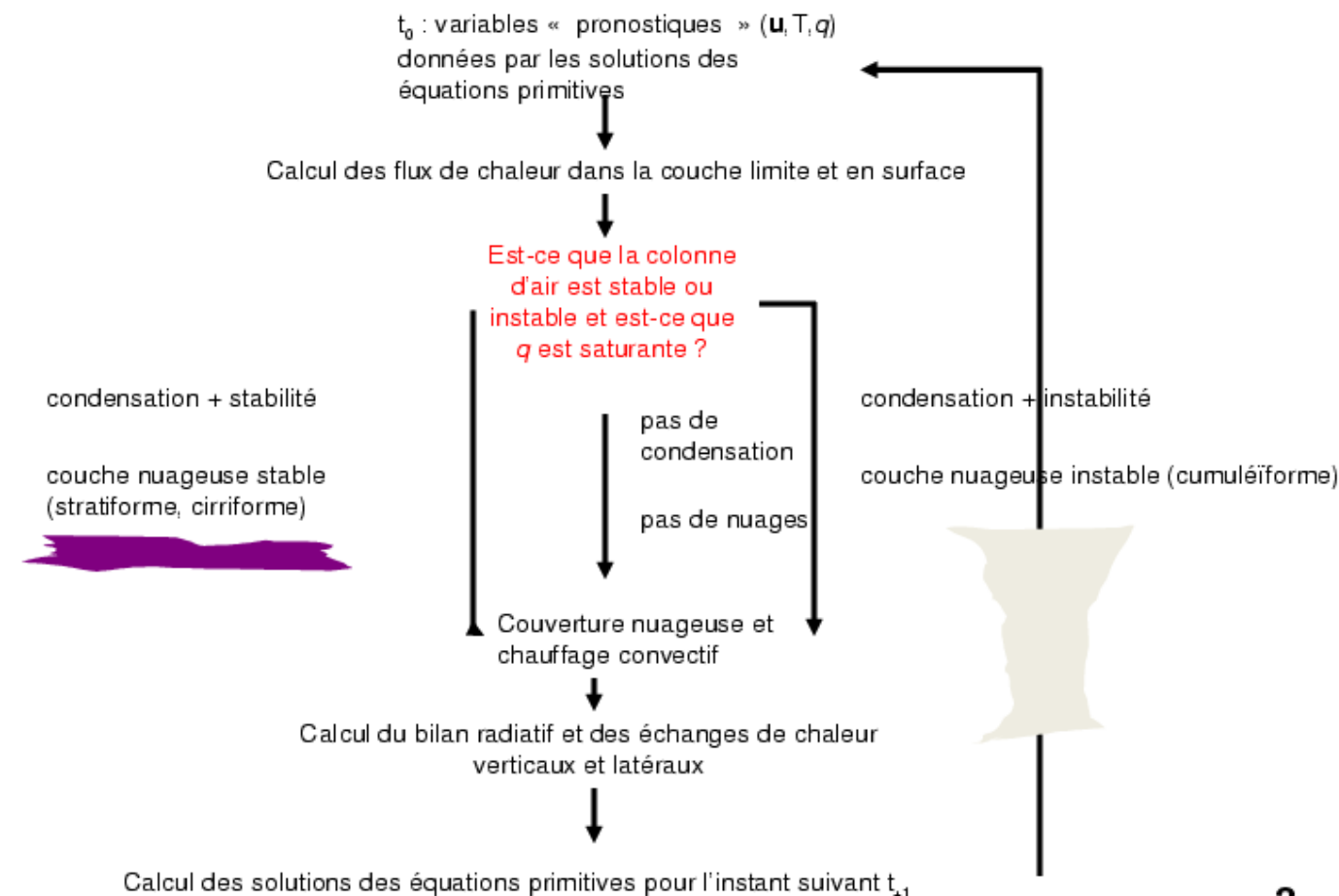
(rayonnement, condensation)

Cycle hydrologique

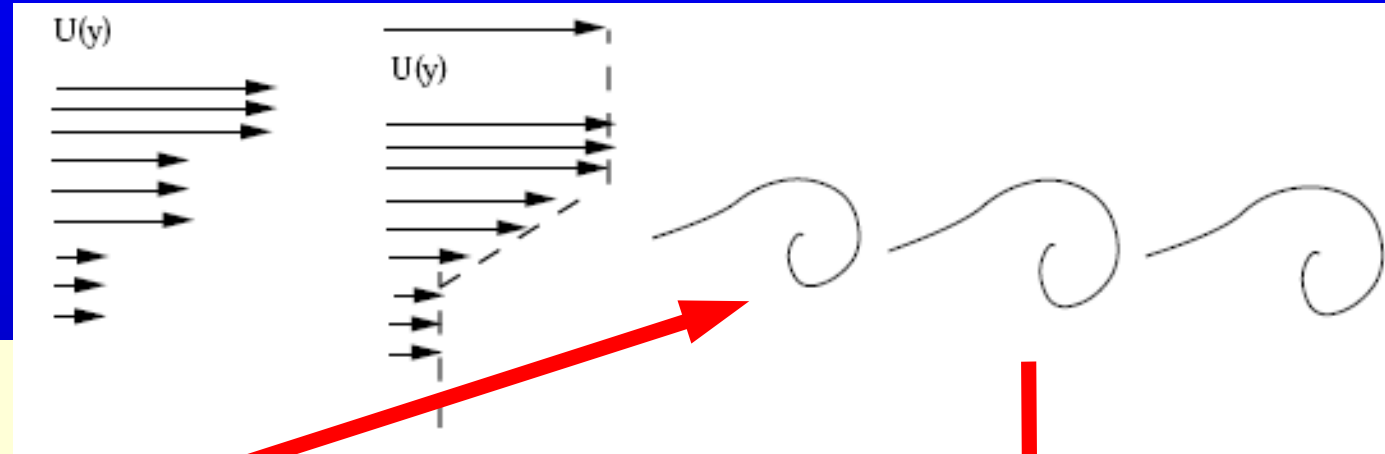
«Physique»

Paramétriser les nuages

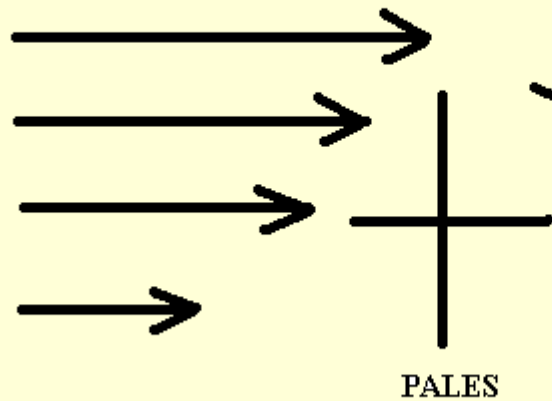
La nécessité de la paramétrisation: l'exemple des nuages



Paramétriser la turbulence



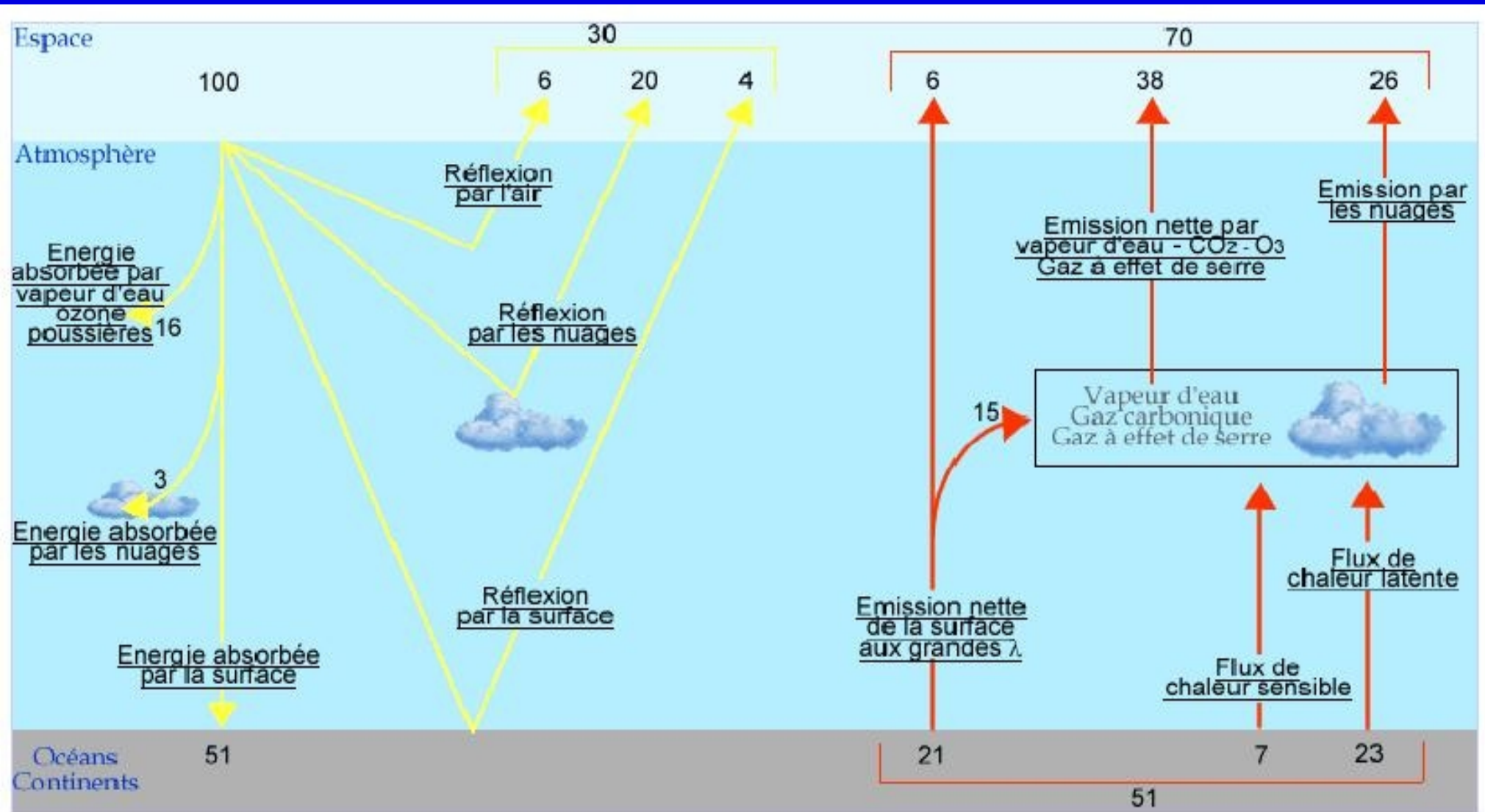
VENTS AUGMENTANT
AVEC L'ALTITUDE



SENS DE ROTATION



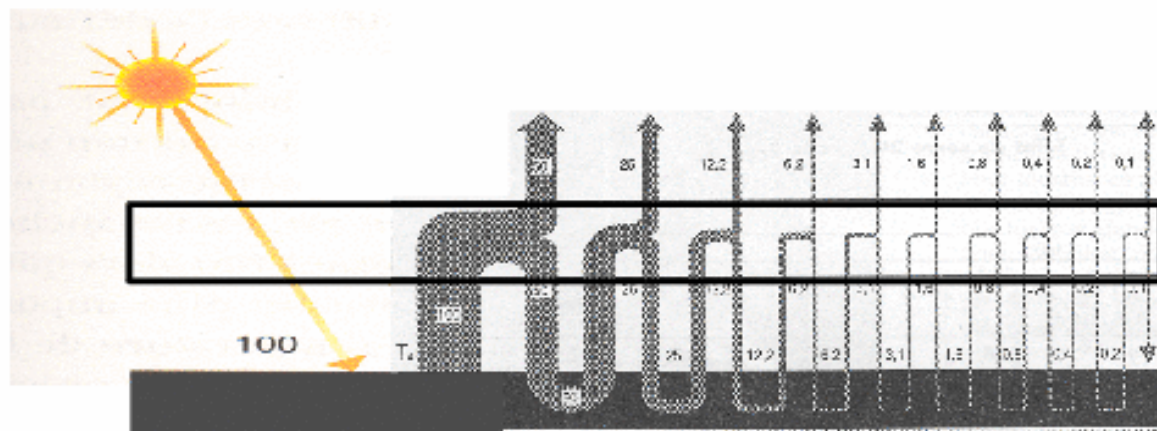
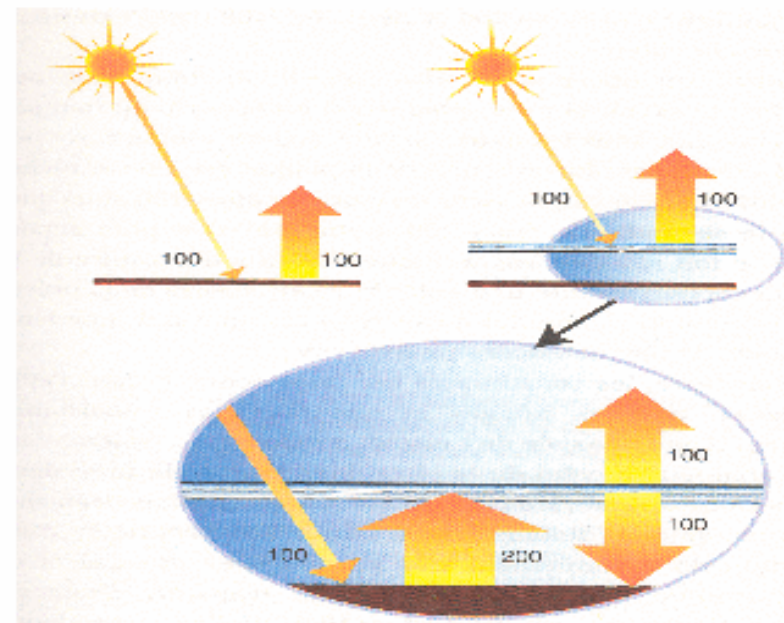
Le forçage radiatif



Le forçage radiatif

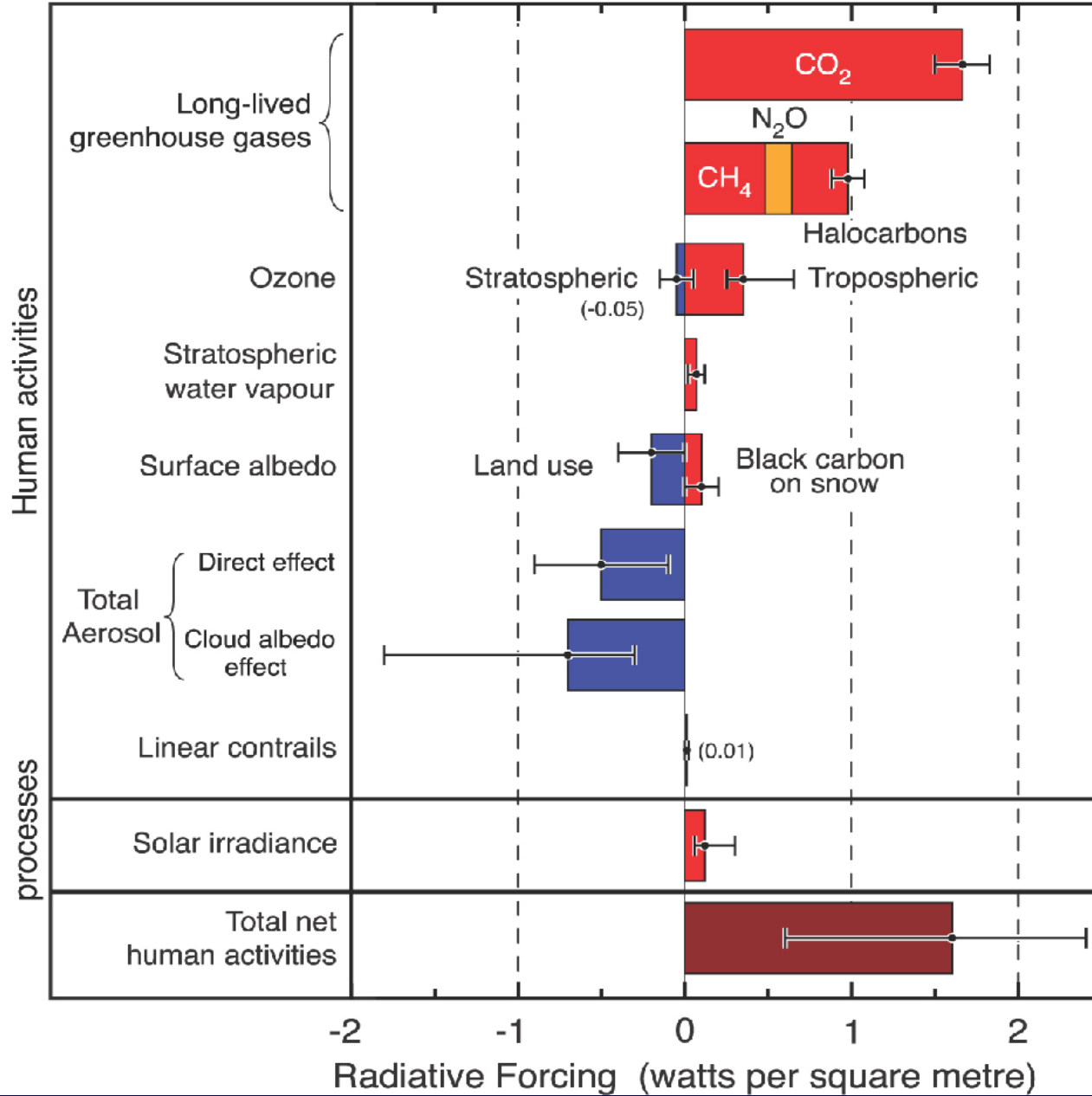
Principe de l'effet de serre

Une vitre opaque au rayonnement infrarouge couvre une surface éclairé par le soleil

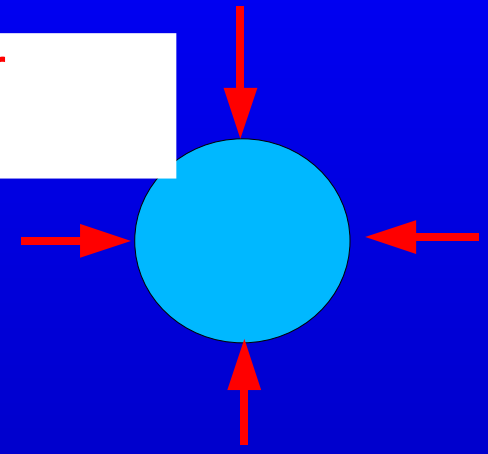


Radiative forcing of climate between 1750 and 2005

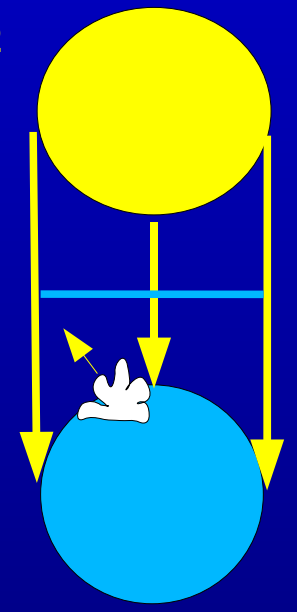
Radiative Forcing Terms



IR, sur
 $4\pi R^2$

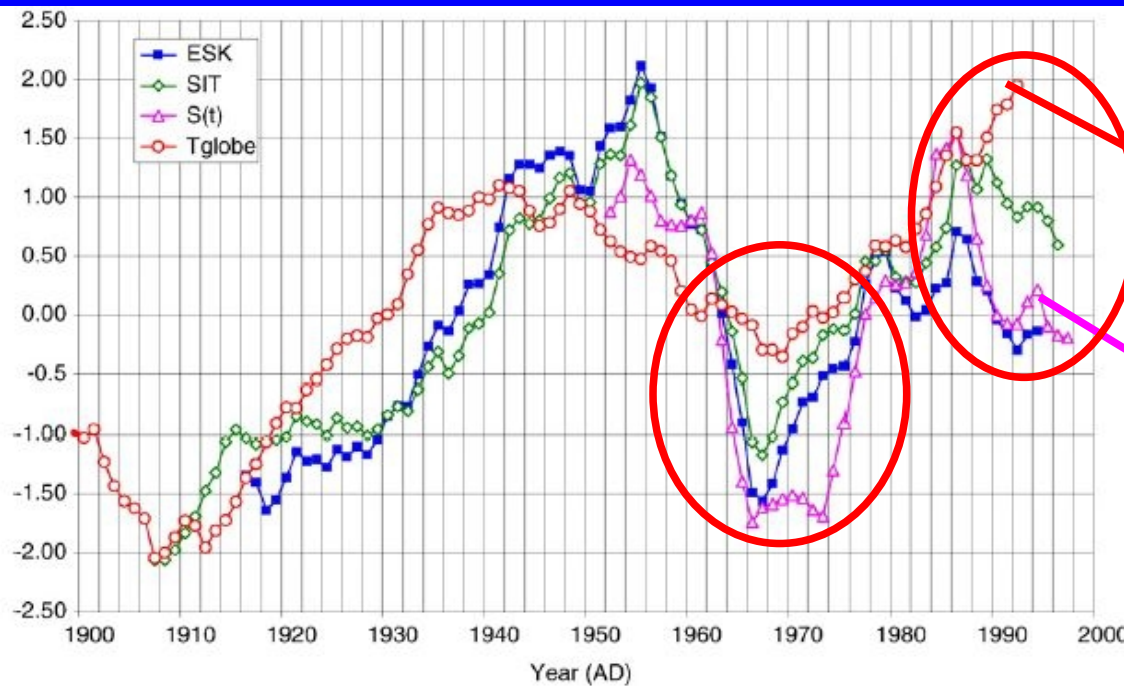


S, sur πR^2



Données tronquées

(Courtilot et al., 2007)

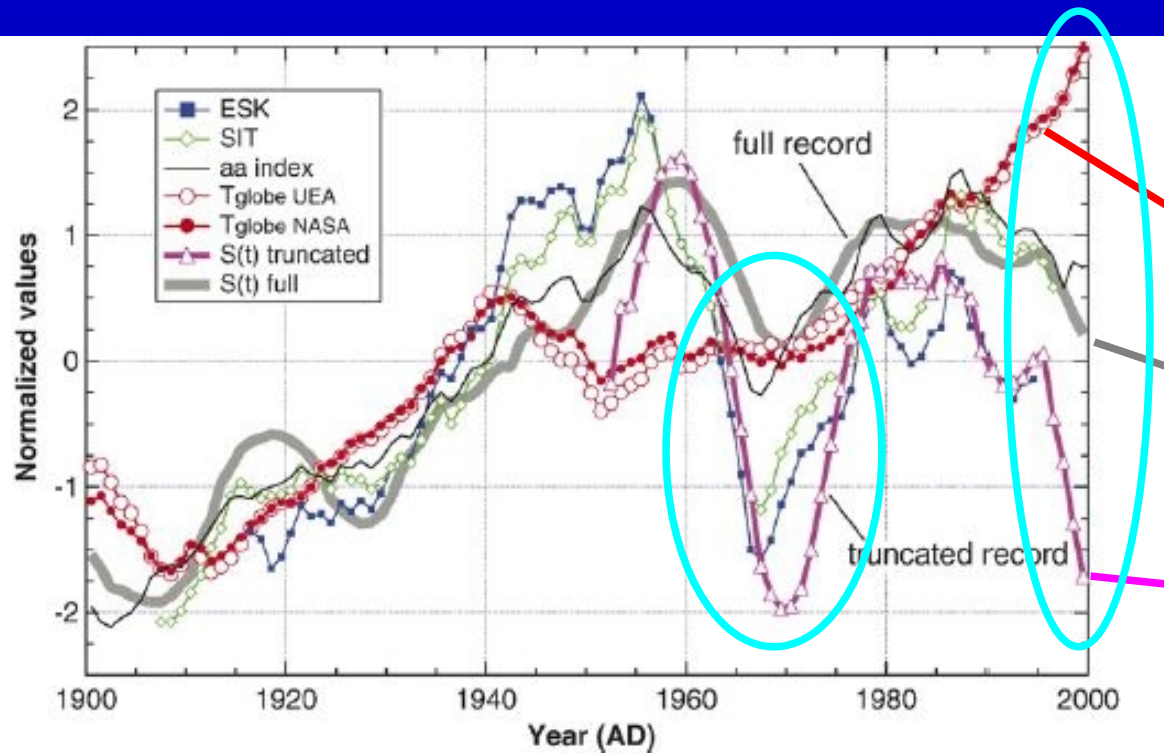


T(continent > 20°N)
présentée comme
T(globe)

Insolation (UV)

Données complètes

(Bard et Delaygue, 2007)



T(globe)

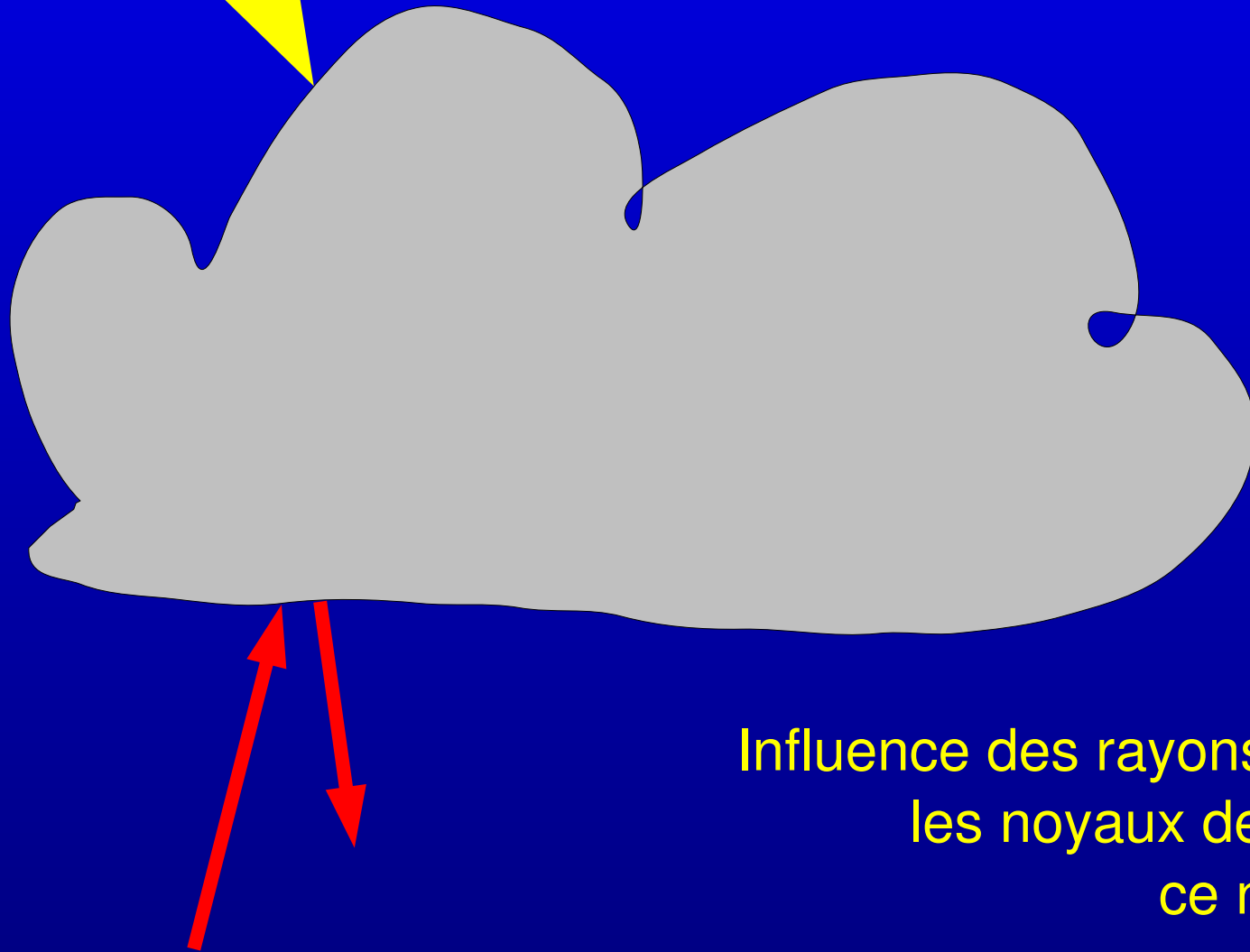
Insolation

Insolation (UV)

Albédo nuages => - 80 W/m²

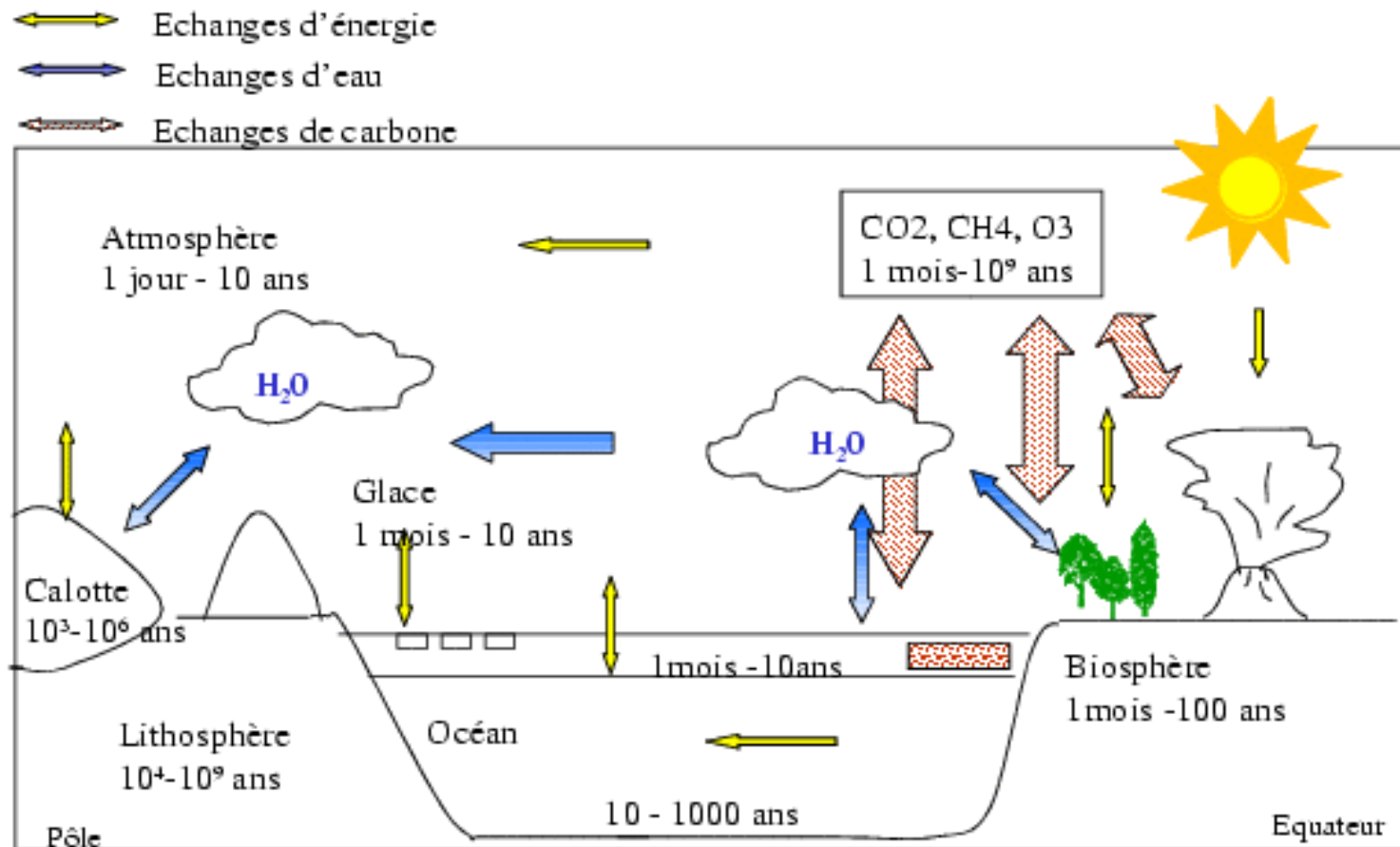
Courtilot: + 3 % nuages => effet de serre CO₂ annulé

MAIS: effet de serre des nuages: 60 W/m²

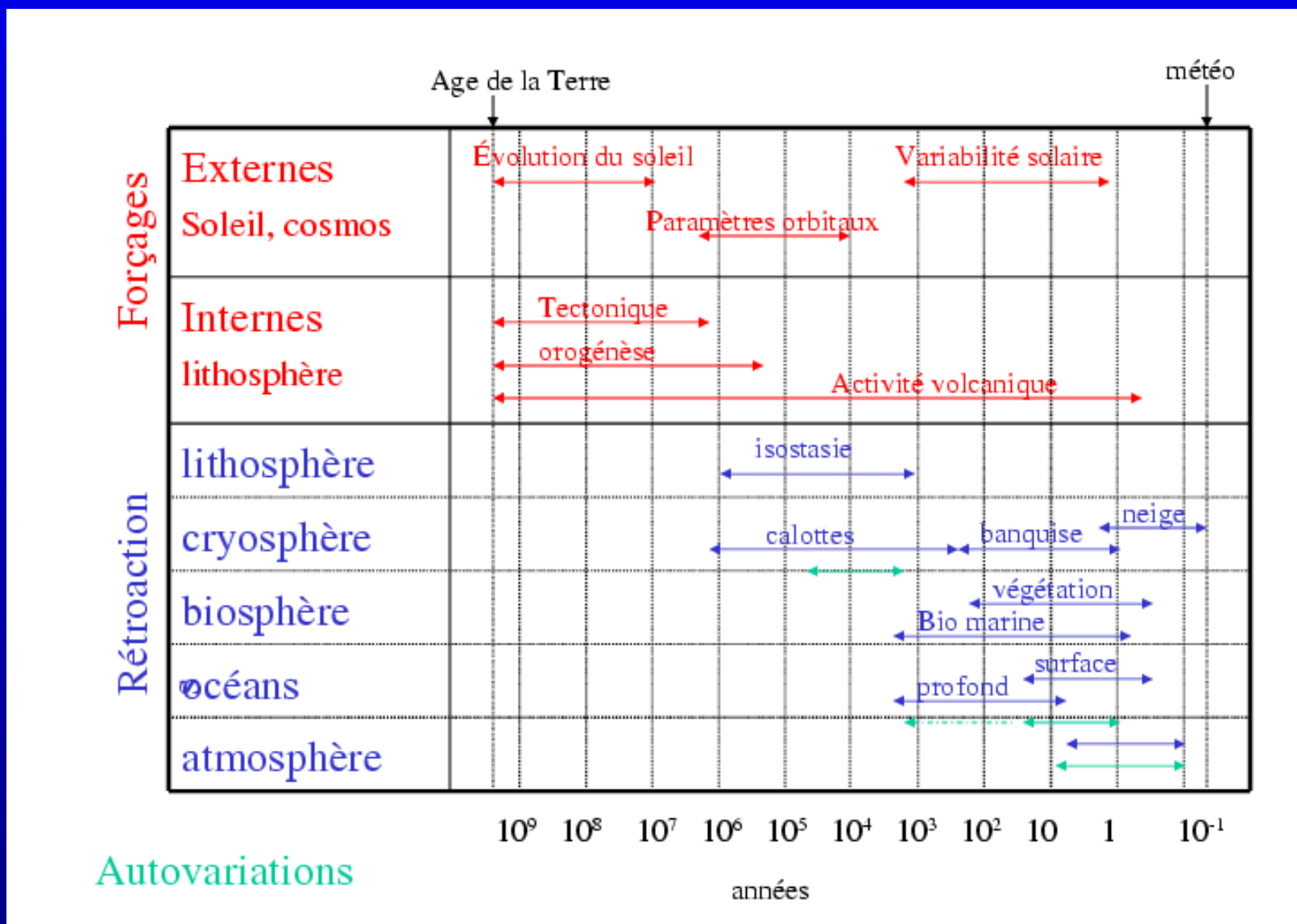


Influence des rayons cosmiques sur
les noyaux de condensation:
ce n'est pas prouvé

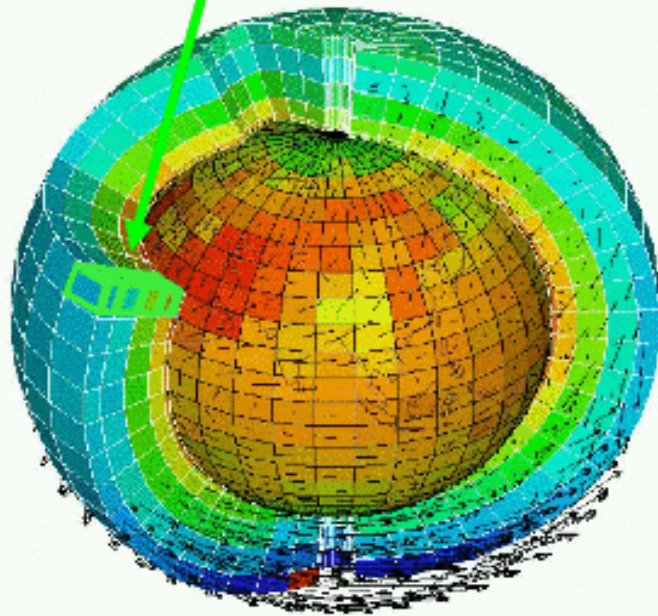
3. Le système climatique



Échelles climatiques



Le modèle climatique couplé de l'IPSL



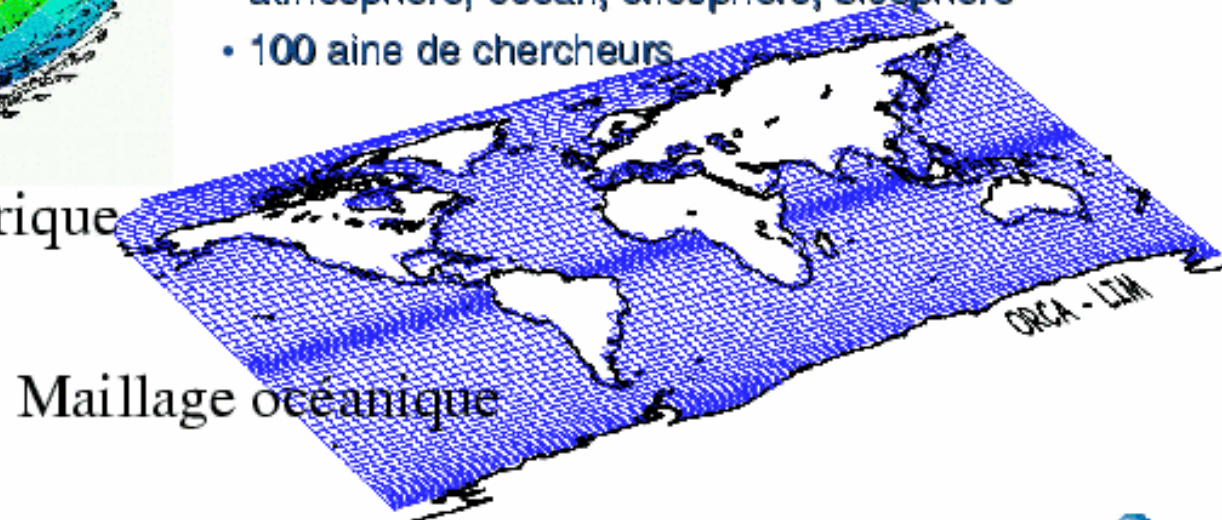
Maillage atmosphérique

Modélisation numérique du climat :

- basée sur les équations de la physique
- mise en oeuvre sur un ordinateur (dimension fine)
- Importance des processus sous-maillage (nuages, ...)

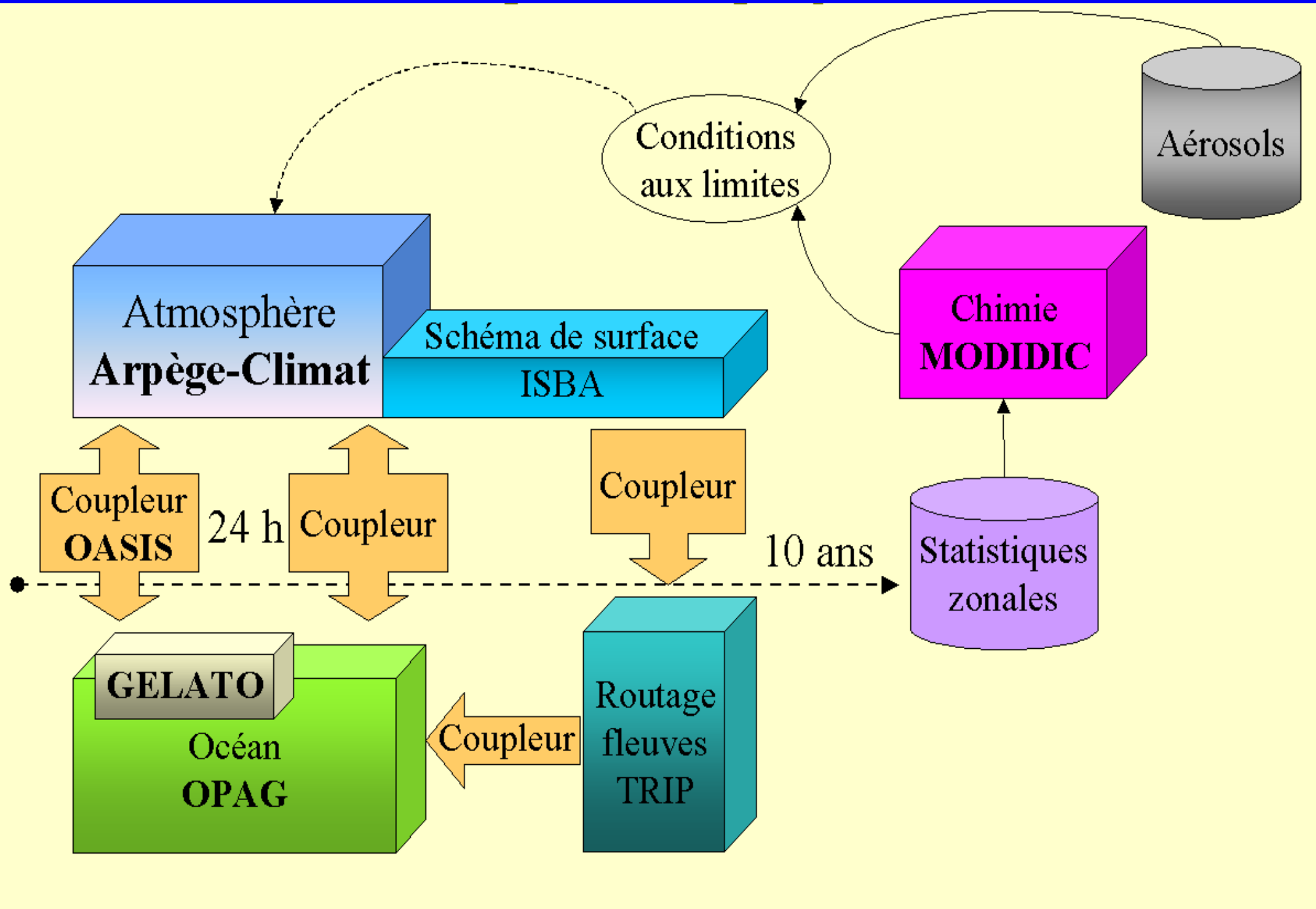
Modèle de climat de l'IPSL :

- atmosphère, océan, cryosphère, biosphère
- 100 aine de chercheurs

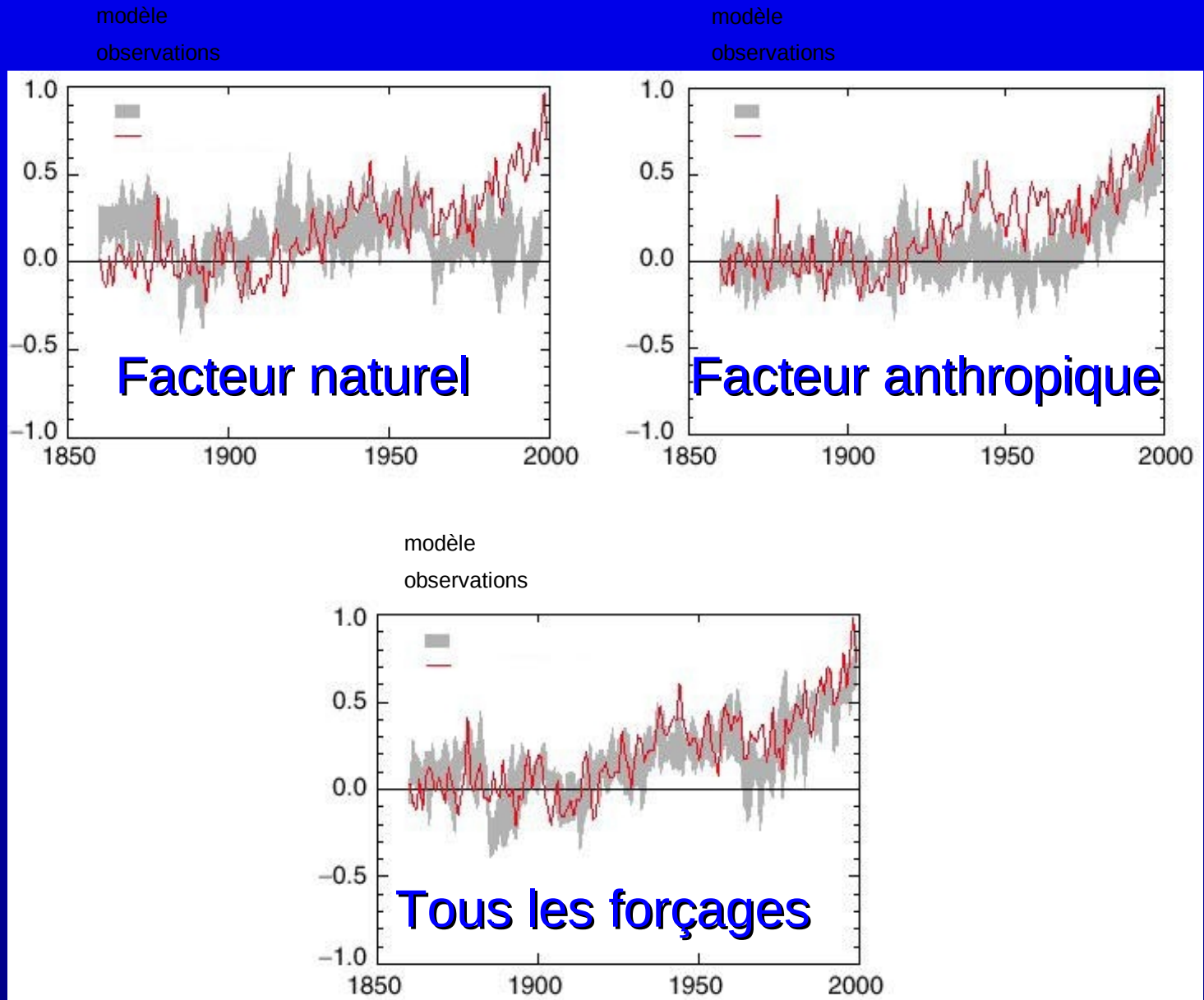


Maillage océanique

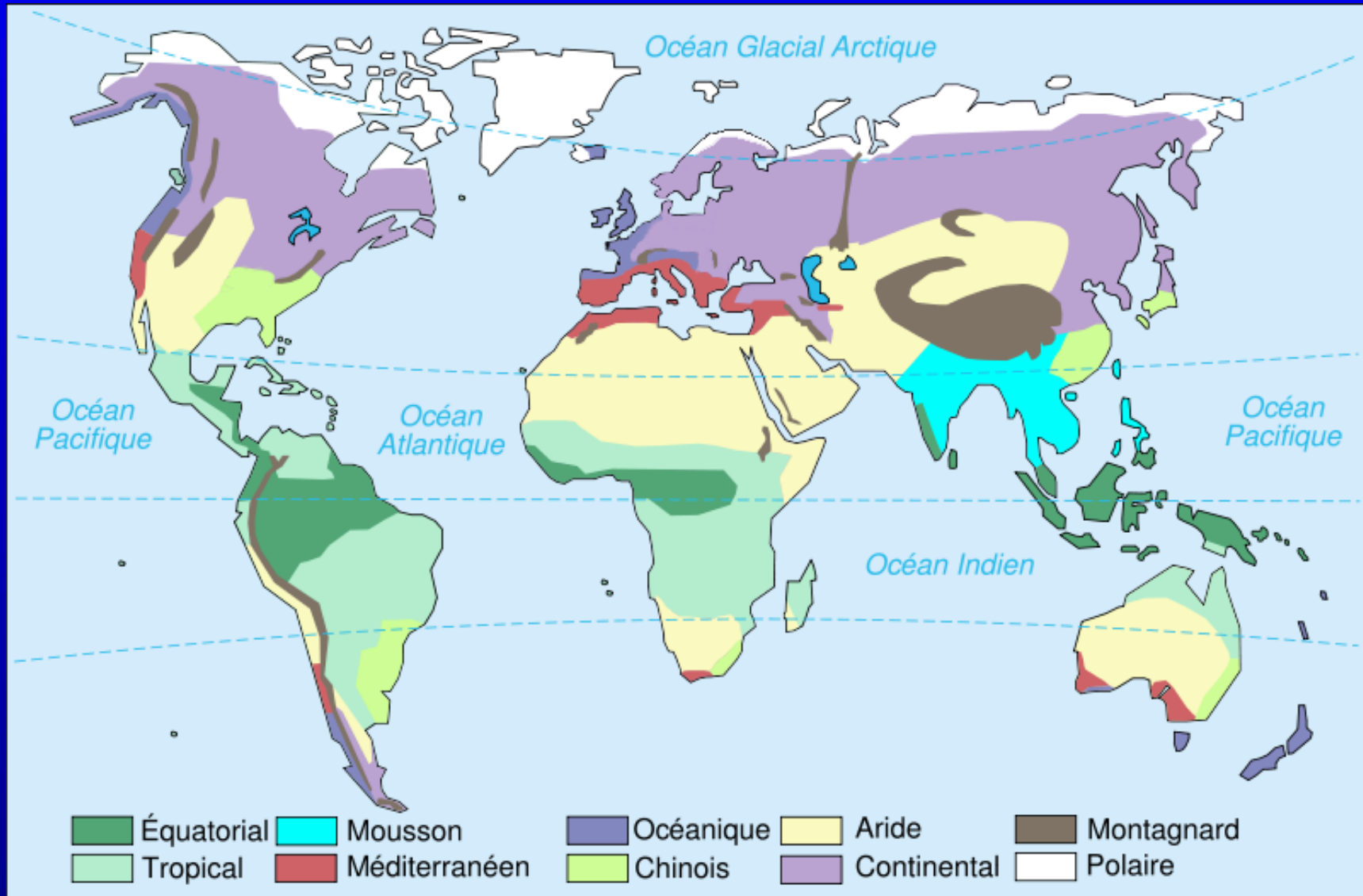
Le modèle climatique couplé de Météo-France



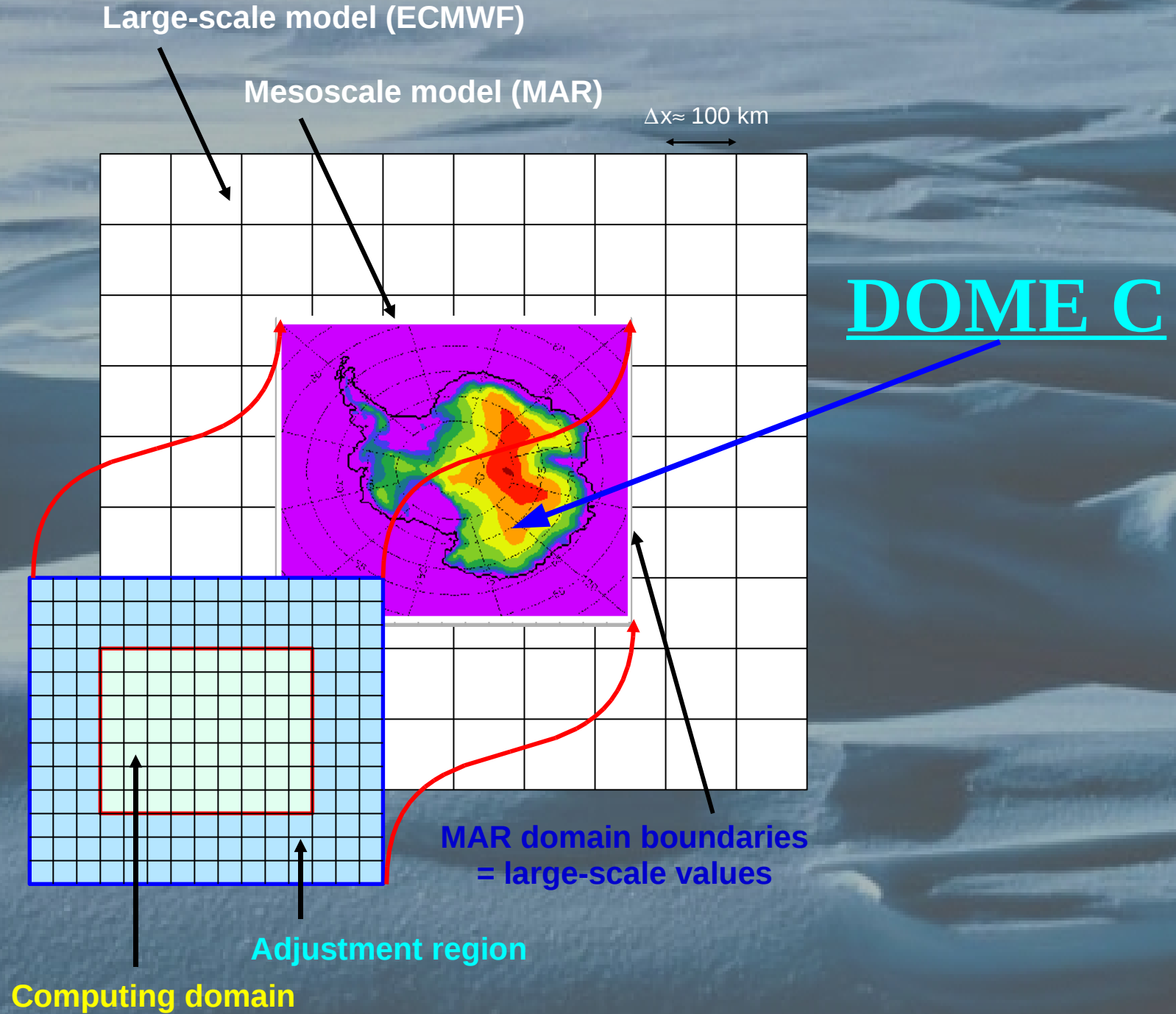
Exemple: simulation de la température moyenne globale



Régionalisation du climat ?

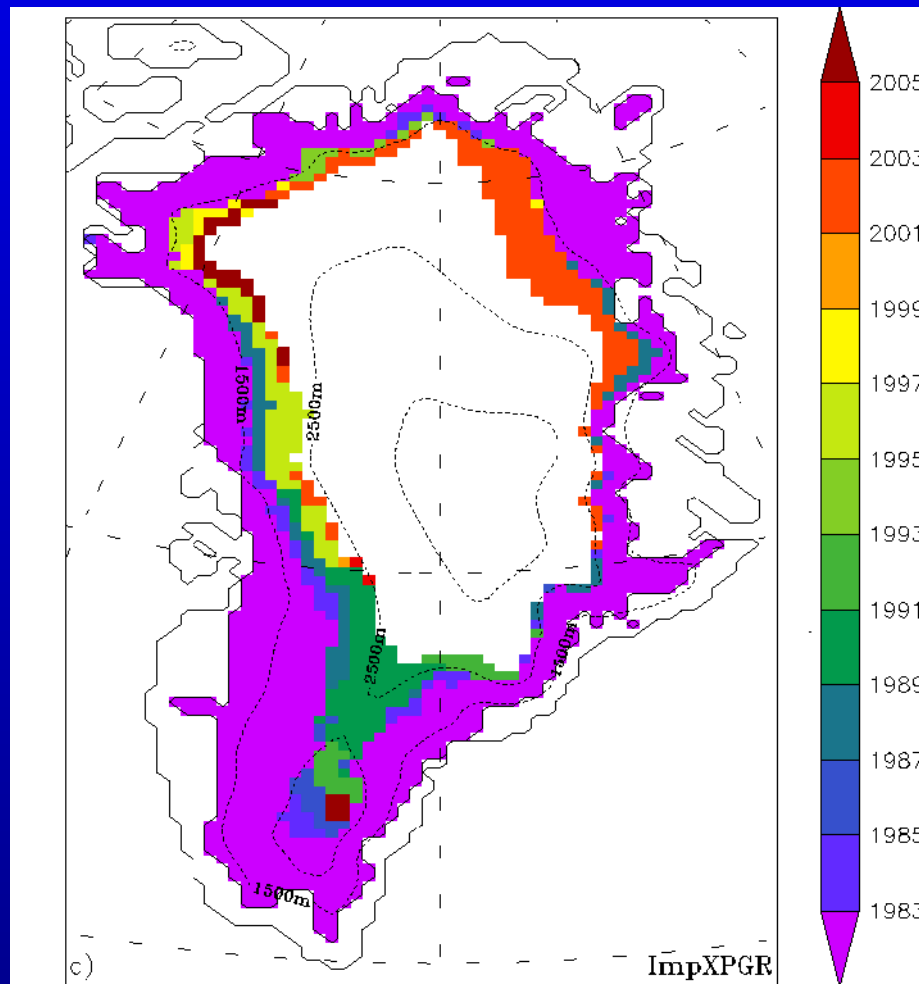


Imbrication: MAR dans ECMWF



Exemple: le Groenland

Augmentation de la fonte
(données satellite SSM/I et modèle MAR)



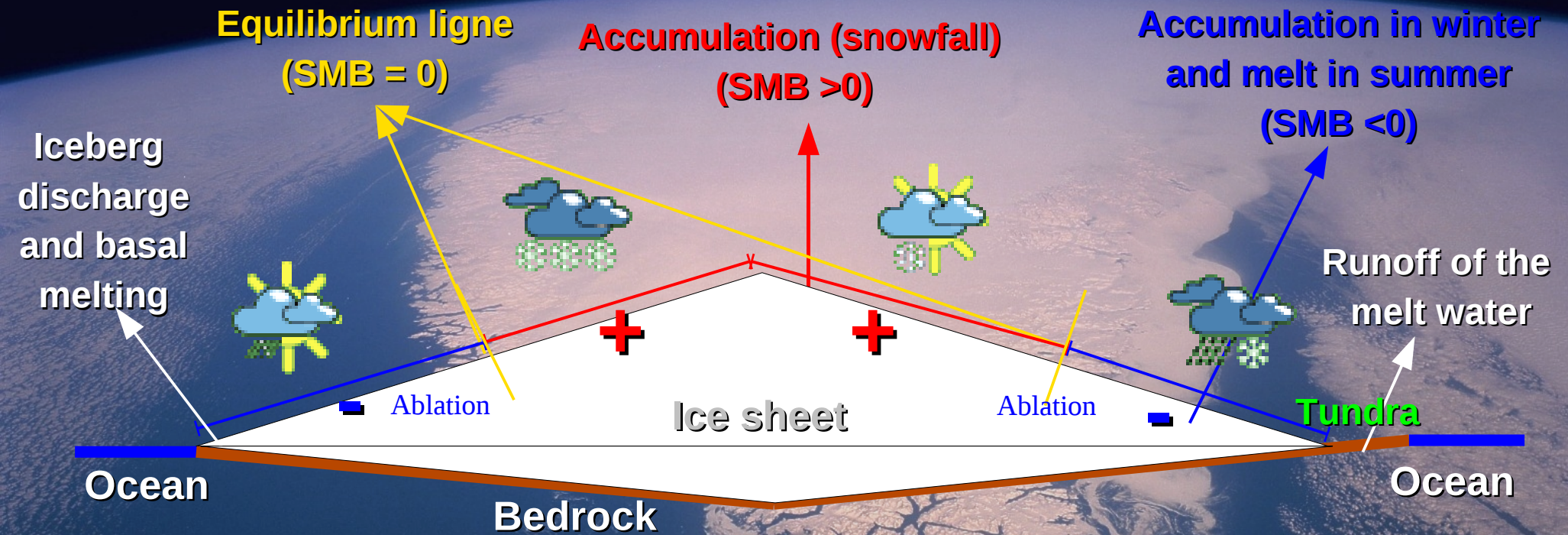
Year of the first recorded
melt day by ImpXPGR (SSMR-SSM/I data)

Surface Mass Balance (SMB)

Not simulated
Here !!

Surface Mass Balance \approx accumulation – runoff of the melt water

Ice sheet Mass Balance \approx accumulation – runoff – iceberg calving

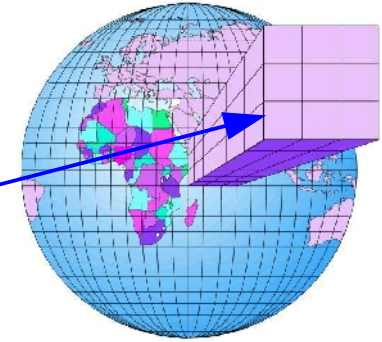


A warmer climate suggests more snowfall in winter but more melt in summer !

➡ What will be dominant in the future ?

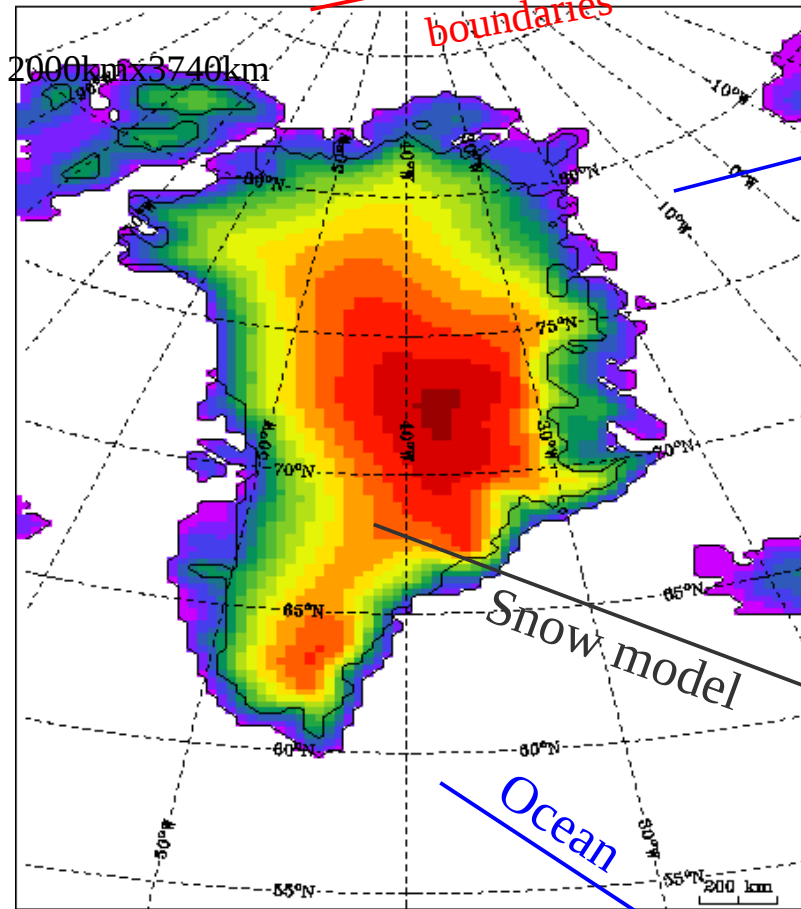
The regional climate MAR model

ERA-40 + ERA-INTERIM reanalysis



Atmospheric boundaries

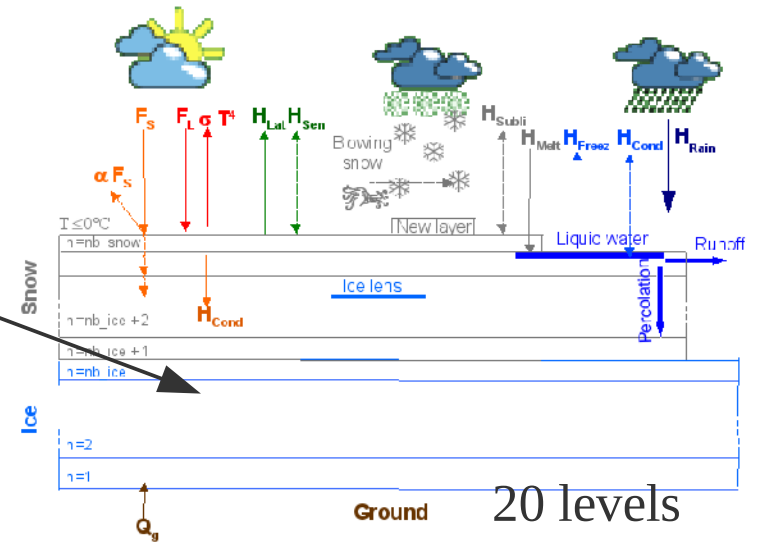
Atmosphere



1st level: 3m, 25th level ~ 21km
Resolution: 25km



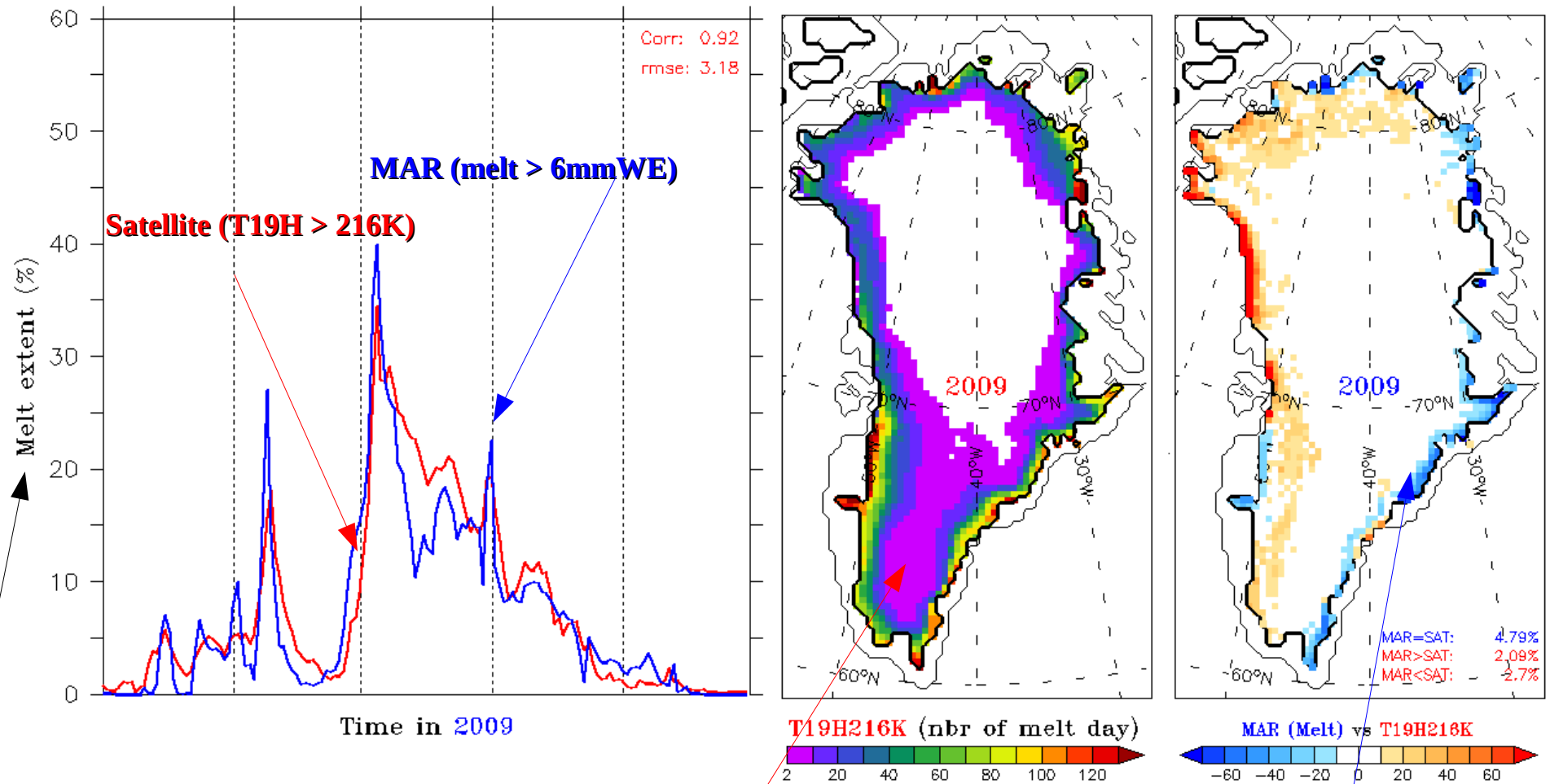
Not coupled with an ice sheet model !



ERA SST + sea-ice

Melt extent (1/3)

MAR versus microwave-derived melt extent during summer 2009

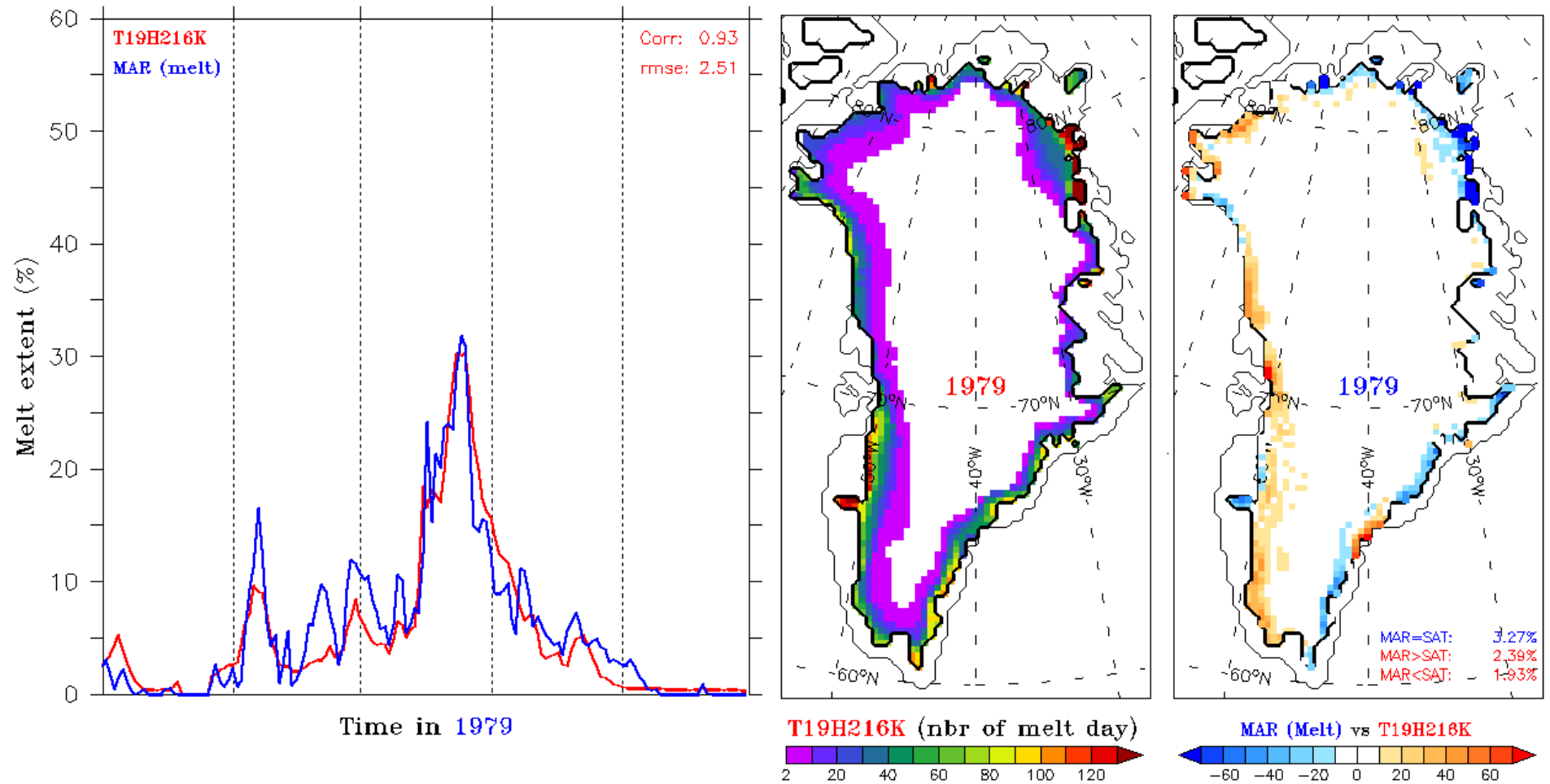


Percentage of the ice sheet

Number of melt day
derived from T19H

Difference with MAR

Melt extent (2/3)



Accumulation nette de neige sur le Groenland:

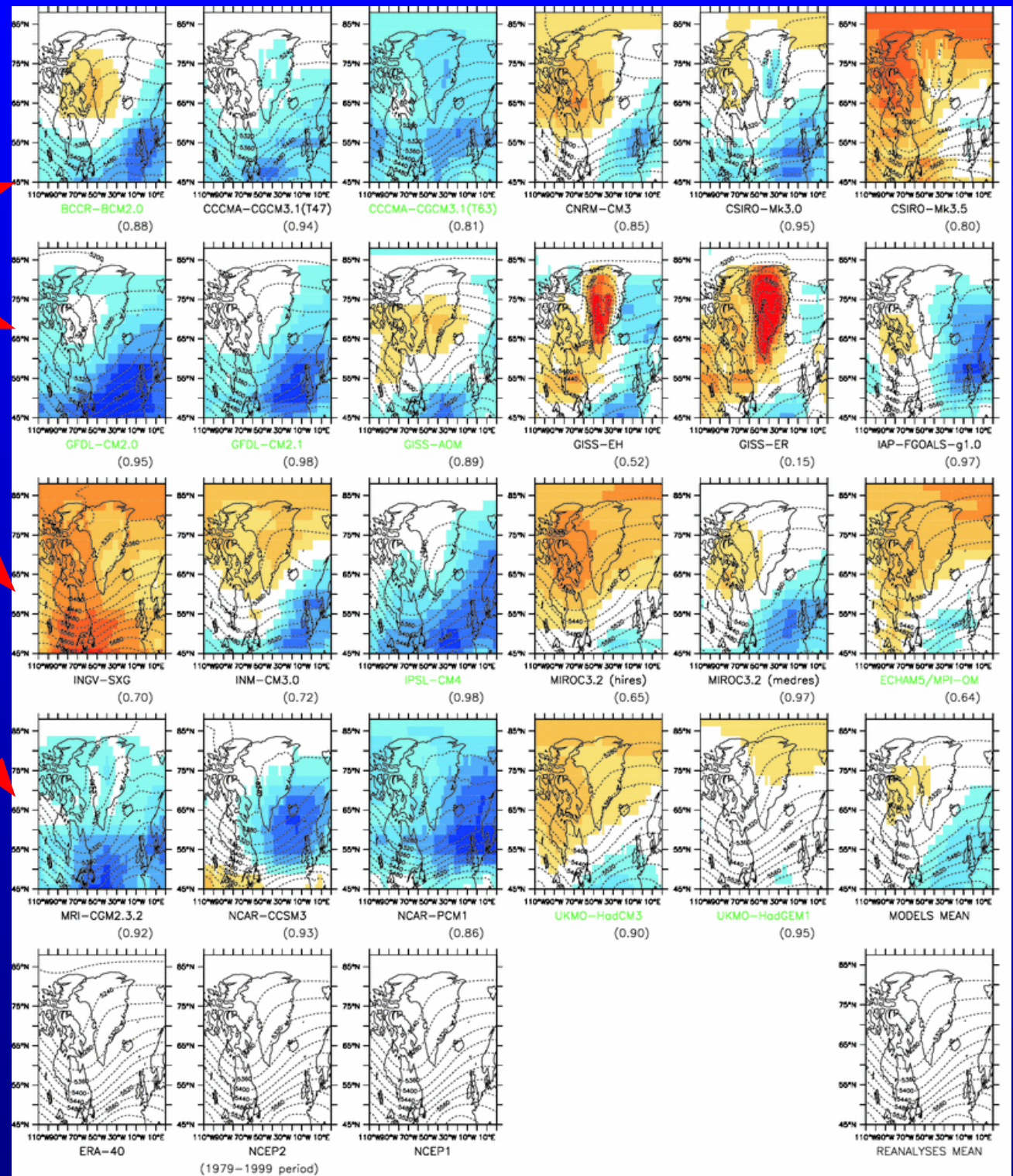
**fonction des précipitations et donc
de la circulation atmosphérique**

fonction du bilan énergétique en surface

Géopotentiel (moyenne)

GCM (cmip3/AR4):
Erreur % réanalyses

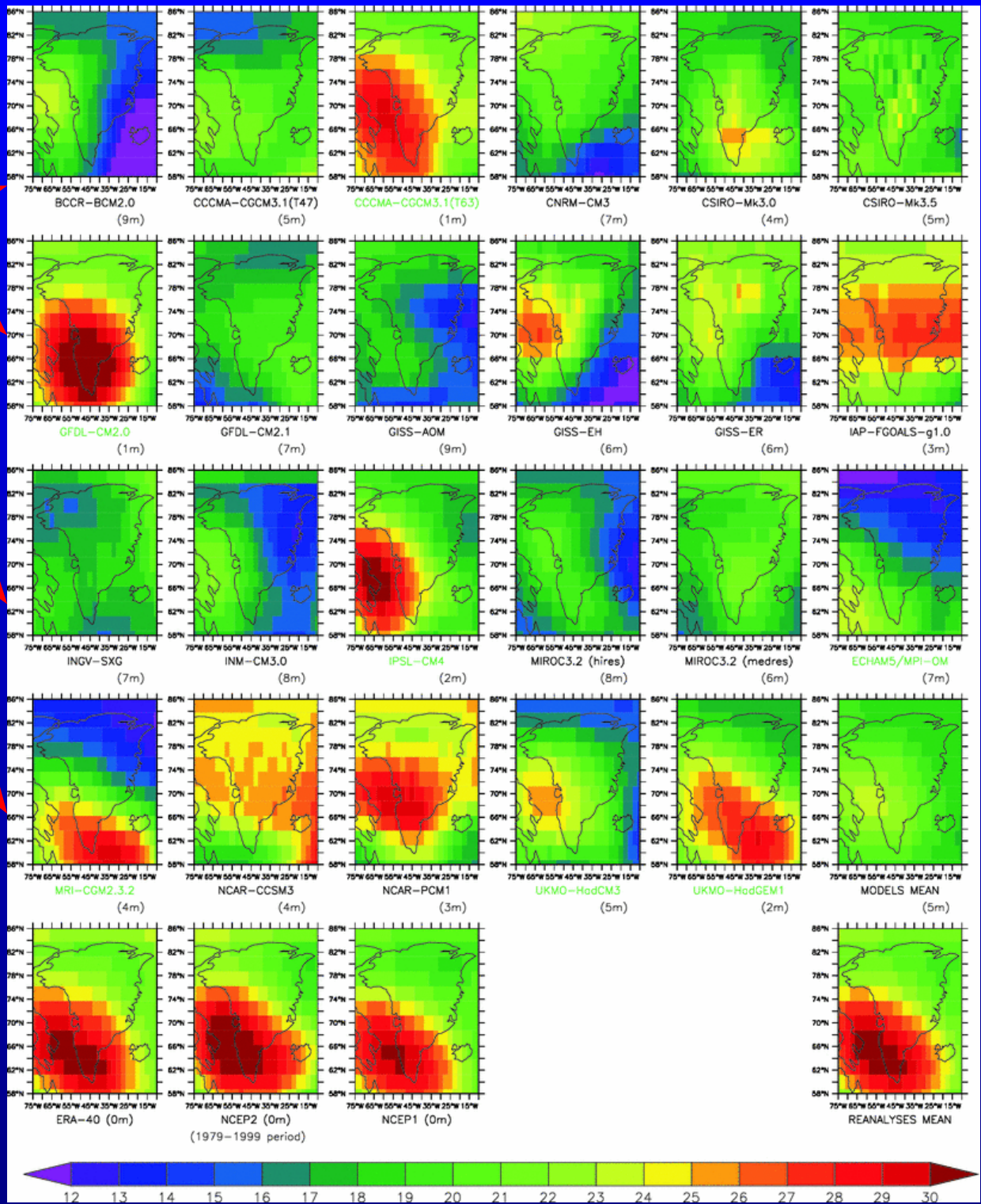
Réanalyses
Météo



Géopotentiel (écart type)

GCM (cmip3/AR4):

Réanalyses
Météo



Conclusions

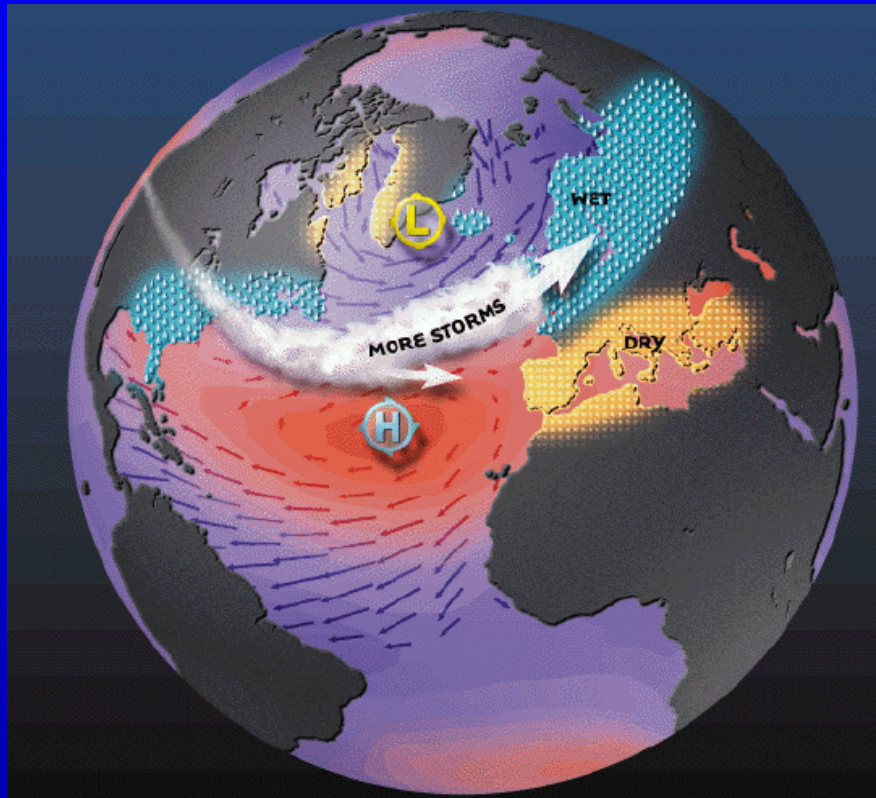
Un modèle est une idéalisation de la réalité

Un modèle climatique permet de comprendre
le fonctionnement de la machine climatique

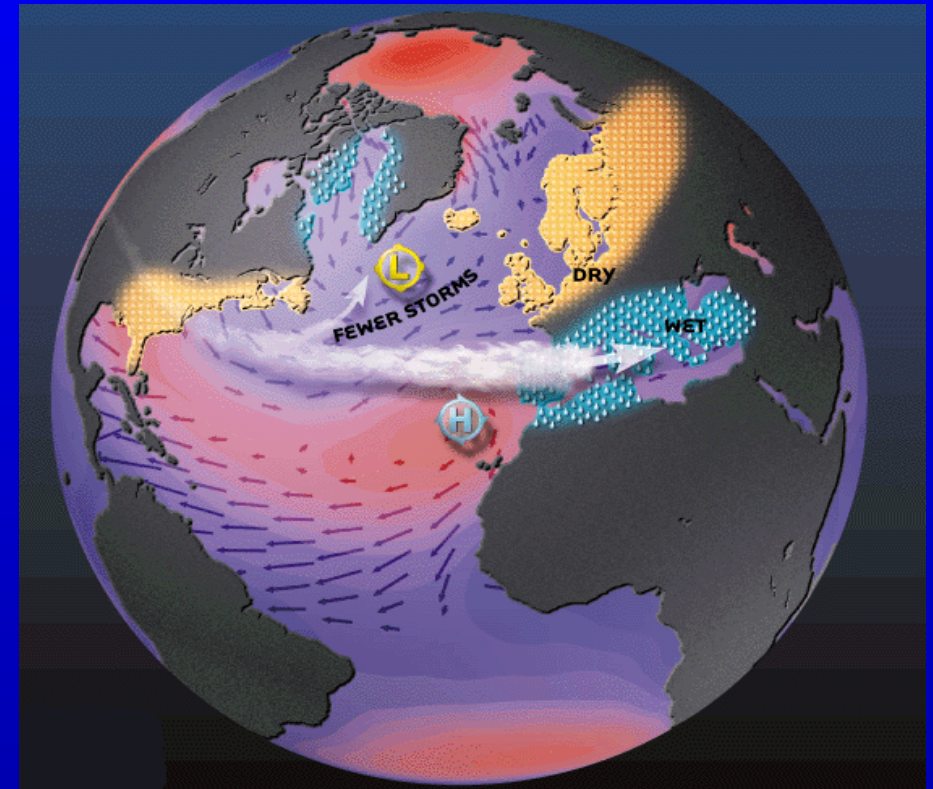
Dans sa version à aire limitée il permet de comprendre
le climat du passé récent avec beaucoup de détails

Un modèle climatique global est capable de reproduire
l'évolution du climat du passé récent
mais d'autant moins bien qu'on regarde dans les détails

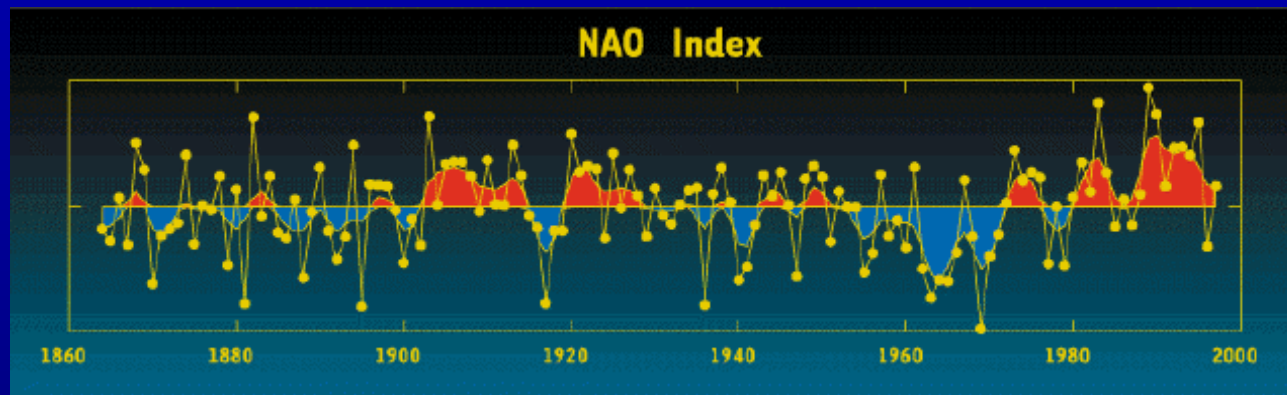
Oscillation Nord Atlantique (NAO)



Phase positive



Phase négative



Problèmes d'interprétation

Évènements extrêmes:

- illustrent le climat futur
- ne sont pas la preuve du réchauffement

Exemple:

Vague de chaleur 2003

